

Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова  
Российская академия наук  
Академии наук Республики Саха (Якутия)  
Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук

# **МАТЕРИАЛЫ**

**Международной конференции  
«Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления  
сейсмичности»**

*23-25 сентября 2015 г.*

Нерюнгри 2015

УДК 550.34  
ББК 26.217  
М 34

Издается по решению Ученого совета Технического института (филиала)  
ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет  
имени М.К. Аммосова» в г. Нерюнгри

**Редакционная коллегия:**

*Имаев В.С.*, д.г.-м.н., профессор (председатель); *Гриб Н.Н.*, д.т.н., профессор;  
*Павлов С.С.*, к.г.-м.н.; *Литвиненко А.В.*, к.т.н.; *Мельников А.Е.*; *Николаева Л.В.* (редактор)

**М34 Материалы Международной конференции «Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности».** – Нерюнгри : Изд-во Технического института (ф) СВФУ, 2015. – 318 с.  
ISBN 978-5-91243-066-4

*В сборнике представлены состояние и результаты исследований в области сейсмотектонических, сейсмологических и геолого-геофизических исследований и связанных с ними процессов в глобальной геологической среде, фундаментального и прикладного направления. Многоплановый характер исследований может быть интересен широкому кругу читателей.*

*Международная конференция «Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности» проведена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (Госзадание в сфере научной деятельности № 5.1771.2014/К), проекта РФФИ № 15-05-20643 и ООО «Нерюнгригеофизика»*

УДК 550.34  
ББК 26.217

ISBN 978-5-91243-066-4

© Технический институт (ф) СВФУ, 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

### Вступительный доклад

*Овсяченко А.Н., Рогожин Е.А.* Результаты оперативного геологического обследования сильнейших землетрясений России в начале XXI века..... 6

### СЕКЦИЯ 1. АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ И СЕЙСМОАКТИВНАЯ СРЕДА

*Баталева Е.А., Баталев В.Ю.* Магнитотеллурический мониторинг напряженно-деформированного состояния среды (для территории центрального Тянь-Шаня)..... 7

*Ряполова Ю.М., Деев Е.В., Сокол Э.В., Кох С.Н., Русанов Г.Г.* Четвертичные травертины Курайской зоны разломов (Горный Алтай): литотипы, петрографические и геохимические характеристики ..... 15

*Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Воднева Е.Н., Семинский А.К.* Идентификация деформационного эффекта по отношениям активностей  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  в подземных водах на профиле Иркутск–Байкал..... 22

*Назаревич А.В., Назаревич Л.Е.* Сейсмичность, сейсмоструктура, распространение возмущений от очаговых зон и прогноз землетрясений (на примере исследований в Карпатском регионе Украины) ..... 30

*Семинский К.Ж., Дэмбэрэл С., Бобров А.А., Мунгунсурен Д.* Разломообразование в земной коре Уулаанбаатарского геодинамического полигона (Монголия): результаты исследования радоновой и сейсмической активности ..... 40

*Мельников А.И., Смелов А.П., Имаев В.С., Тимофеев В.Ф., Кравченко А.А.* Внутреннее строение Тыркандинской shear зоны (Якутия) ..... 48

*Козьмин Б.М.* Развитие сейсмоструктурных исследований в Южной Якутии..... 56

*Середкина А.И., Козьмин Б.М.* Определения очаговых параметров землетрясений Южной Якутии по поверхностным волнам ..... 63

*Борняков С.А., Мирошниченко А.И., Салко Д.В.* Диагностика метанестабильного состояния сейсмоактивного разлома по данным деформационного мониторинга ..... 71

### СЕКЦИЯ 2. ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

*Добрынина А.А., Саньков В.А., Чечельницкий В.В.* Новые данные о затухании сейсмических волн в литосфере и верхней мантии северо-восточного фланга Байкальской рифтовой системы..... 80

*Константинов К.М., Забелин А.В., Константинов И.К., Яковлев А.А., Киргуев А.А.* Развитие петромагнитной базы данных Восточной Сибири ..... 87

*Меркулова Т.В.* Сейсмолинементы Восточного Приамурья по анализу сейсмичности в 1968-2009 гг. .... 95

*Ключевский А.В.* Байкальская рифтовая система: признаки нелинейной самоорганизующейся системы..... 103

*Ключевская А.А., Демьянович В.М., Ключевский А.В., Зувев Ф.Л., Какоурова А.А.* Группы землетрясений и группирующаяся сейсмичность в литосфере Байкальской рифтовой системы ..... 111

*Цыдыпова Л.Р., Тубанов Ц.А., Толочко В.В., Базаров А.Д.* Некоторые результаты сейсмомониторинга по данным Селенгинской локальной сети..... 120

<i>Харитонов М.Е., Колотова Л.Г., Рябинкин К.С.</i> Графики повторяемости слабых землетрясений вблизи Бурейской ГЭС до и после наполнения водохранилища .....	129
<i>Курткин С.В., Седов Б.М., Мяки К.Д.</i> Природа сейсмичности Восточной Чукотки и прилегающего шельфа .....	136
<i>Базаров А.Д., Черных Е.Н., Цыдыпова Л.Р.</i> Вейвлет анализ сейсмического воздействия на 9-ти этажное здание серии 135 .....	143
<i>Имаев В.С., Имаева Л.П., Гриб Н.Н., Колодезников И.И., Никитин В.М.</i> Сейсмотектонический контроль эпицентральных полей северо-восточного фланга Байкальского рифта и Олекмо-Становой сейсмической зоны .....	149
<b>СЕКЦИЯ 3. ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ. НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ</b>	
<i>Колотова Л.Г., Харитонов М.Е., Пупатенко В.В., Рябинкин К.С.</i> Спектральный состав микросейсм до и после слабых землетрясений Тан Лу .....	155
<i>Серебрянников С.П., Батсайхан Ц.</i> Изучение современных и древних деформаций в зонах разломов Монголии .....	162
<i>Брыжак Е.В., Ескин А.Ю., Шагун А.Н.</i> Синтез исходного сигнала для прогноза сейсмических воздействий на основания линейных сооружений с учетом деградации мерзлоты .....	167
<i>Джурик В.И.</i> Основы и результаты инженерно-сейсмологического прогноза для территорий восточного фланга Байкальской рифтовой зоны и Южной Якутии .....	175
<i>Леви К.Г., Козырева Е.А., Мирошниченко А.И., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А.</i> Защита социально-экономической инфраструктуры Восточной Сибири от природных опасностей .....	184
<i>Герман В.И.</i> Техногенные землетрясения и прогноз обрушений на Жезказганском месторождении .....	194
<i>Черных Е.Н.</i> Экспериментальная оценка сейсмического действия массовых взрывов в разрезе «Нерюнгринский» на охраняемые объекты .....	200
<i>Гриб Г.В., Колодезников И.И., Трофименко С.В., Никитин В.М.</i> Наведенная сейсмичность, инициированная буровзрывными работами на разрезе «Нерюнгринский» .....	208
<b>СЕКЦИЯ 4. СЕЙМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ</b>	
<i>Петров А.Ф., Козьмин Б.М., Шibaев С.В., Тимириин К.В.</i> Уточнённая карта сейсмического районирования территории Республики Саха (Якутия) .....	215
<i>Герман Е.И., Тубанов Ц.А., Предеин П.А.</i> Добротность земной коры центральной части Байкальской рифтовой зоны по данным станций «Хурамша» и «Фофоново» .....	223
<i>Семенов Р.М., Лопатин М.Н.</i> Вариации концентраций растворенного радона в подземных водах Южного Прибайкалья и прогноз времени возникновения землетрясений .....	228
<i>Смекалин О.П., Чипизубов А.В., Имаев В.С., Дэмбэрэл С., Баттогтох Д., Гриб Н.Н., Сясько А.А., Качаев А.В.</i> Новые геолого-геофизические данные для оценки сейсмической опасности столицы Монголии .....	234

*Никонов А.А., Шварев С.В.* Сейсмолинеаменты и разрушительные землетрясения в российской части Балтийского щита: новые решения для последних 13 тысяч лет..... 243

## **СЕКЦИЯ 5. ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И АРХЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

*Турова И.В., Деев Е.В., Корженков А.М., Лужанский Д.В., Гладков А.С.* Неизвестные древние землетрясения в Алабаш-Конуроленской внутригорной впадине (Южное Прииссыккулье, Киргизия)..... 252

*Чипизубов А.В.* Современная геодинамика Прибайкалья..... 259

*Никонов А.А.* Новый подход к оценке сейсмического потенциала и сейсмической опасности Черноморского побережья Кавказа (по археосейсмическим материалам)..... 267

*Лобова Е.Ю., Деев Е.В., Зольников И.Д.* Следы древних землетрясений в Яломанском грабене (Горный Алтай) ..... 275

## **СЕКЦИЯ 6. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

*Федюк Р.С., Мочалов А.В., Тимохин А.М., Муталибов З.А., Ильинский Ю.Ю.* Изучение сейсмического режима Приморья (с позиций строительства) ..... 283

## **СЕКЦИЯ 7. ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

*Герман В.И.* Теория подобия пространственной и временной структуры сейсмичности 288

*Трофименко С.В., Гриб Н.Н.* Геофизические исследования на прогностических полигонах Южной Якутии. История и современность ..... 295

*Трофименко С.В., Быков В.Г.* Волновые эффекты в пространственно-временных проявлениях сейсмичности северо-востока Амурской плиты..... 304

## Вступительный доклад

### РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЕРАТИВНОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ РОССИИ В НАЧАЛЕ XXI ВЕКА

Овсюченко А.Н., Рогожин Е.А

*ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, e-mail: eurog1947@yandex.ru*

Сеймотектоническая группа ИФЗ РАН провела обследование эпицентральных областей сильнейших землетрясений, произошедших в разных регионах России в начале XXI века. Это такие сейсмические события, как Алтайское ( $M=7.3$ , 2003 г.), Олюторское ( $M=7.8$ , 2006 г.), два Тувинских ( $M=6.7$ , 2011 г. и  $M=6.8$ , 2012 г.) и Сковородинское ( $M=6.0$ , 2011 г.). Были закартированы сейсмодислокации разных типов, составлены детальные планы деформаций поверхности на наиболее представительных участках, проведено палеосейсмологическое изучение очаговой области. В ближней зоне на основе изучения плотности распределения сейсмодислокаций были построены изосейсты высших баллов. Подтвердилось представление о нарастании площади, охваченной сейсмогенными нарушениями, с ростом магнитуды главного толчка. Оценка длины сейсморазрывов и амплитуды смещения по ним в эпицентральных зонах четырех первых из перечисленных событий также показала рост этих параметров для более сильных землетрясений по сравнению с более слабыми. Результаты палеосейсмологических исследований позволили заключить, что в этих очагах в голоцене уже неоднократно имели место высокомагнитудные землетрясения. Радиоуглеродное датирование отобранных образцов захороненных палеопочв позволило оценить период повторяемости сильнейших толчков в этих же очагах и реконструировать долговременную сейсмическую историю охваченных современными землетрясениями регионов. Использование сейсмологических данных о распределении повторных толчков дало возможность построить трехмерную модель очагов. Алтайское, Тувинские и Сковородинское землетрясения возникли в соответствующих зонах балльности Карт ОСР-97, а Олюторское продемонстрировало ошибку карт типа «пропуска цели». Собранные данные составили основу для оценки сейсмической опасности изученных регионов на детальном уровне.

УДК 550.372

**МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СРЕДЫ (ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ)**

**Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке, г. Бишкек, 720049, Кыргызская Республика, e-mail: bataleva@gdirc.ru*

**В работе представлены результаты магнитотеллурического мониторинга, проводимого Научной станцией РАН на территории Центрального Тянь - Шаня. Особое внимание уделялось проявлению разломных структур в распределении электромагнитных параметров. Обнаружены характерные изменения электромагнитных параметров, которые могут быть объяснены перераспределением флюидов между системами трещин. При анализе частотно-временных рядов данных МТ-мониторинга выявлена связь между изменениями  $\rho_k$  и местоположением (азимутальным углом) групп эпицентров землетрясений для рассматриваемых интервалов времени. На основе корреляционного анализа гравитационных приливных воздействий и результатов магнитотеллурического мониторинга выявлена азимутальная зависимость тензочувствительности среды.**

Ключевые слова: естественное электромагнитное поле, магнитотеллурический мониторинг, землетрясение, тензор импеданса, зоны активных разломов.

**MAGNETOTELLURIC MONITORING STRESSED AND DEFORMED STATE OF MEDIUM (FOR THE TERRITORY OF THE CENTRAL TIEN SHAN)**

**E.A. Bataleva, V.Yu. Batalev**

*The Federal State Budgetary Institution of Science - Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek city. Bishkek-49, 720049, Kyrgyz Republic, e-mail: bataleva@gdirc.ru*

**This paper presents the results of magnetotelluric monitoring carried out by the Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek for the territory of the central Tien Shan. The special attention was paid on appearance of fault structures in distribution of electromagnetic parameters. Distinctive changes of investigated electromagnetic parameters explained by redistribution of fluids through system of cracks are found. The analysis of time-and-frequency series of MT-monitoring data revealed regularities in apparent resistivity changes and location (azimuths) of earthquake focus for examine time intervals. On the basis of correlation analysis of tidal gravitational effects and results of magnetotelluric monitoring azimuthal dependence of the tensosensitivity of the medium was revealed.**

Key words: natural electromagnetic field, magnetotelluric monitoring, earthquake, impedance tensor.

## Введение

Мониторинговые наблюдения с помощью метода магнитотеллурического зондирования выполняются на Бишкекском геодинамическом полигоне (БГП) с 2003 года, когда канадская компания «Феникс Геофизикс» совместно с Научной станцией РАН установила две станции Феникс MTU-5D на стационарных пунктах Аксу и Чон-Курчак [6-8]. Обе станции находятся на территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП), который в свою очередь является частью Северо-Тяньшаньской сейсмогенерирующей зоны (Рис. 1.), регистрация данных осуществляется круглосуточно в интервале периодов 0,01-1000 с. В процессе осуществления непрерывных магнитотеллурических наблюдений не реже одного раза в 3 месяца контролируются такие характеристики измерительной системы как стабильность коэффициента передачи канала и форма амплитудно-фазовой частотной характеристики [6-8].

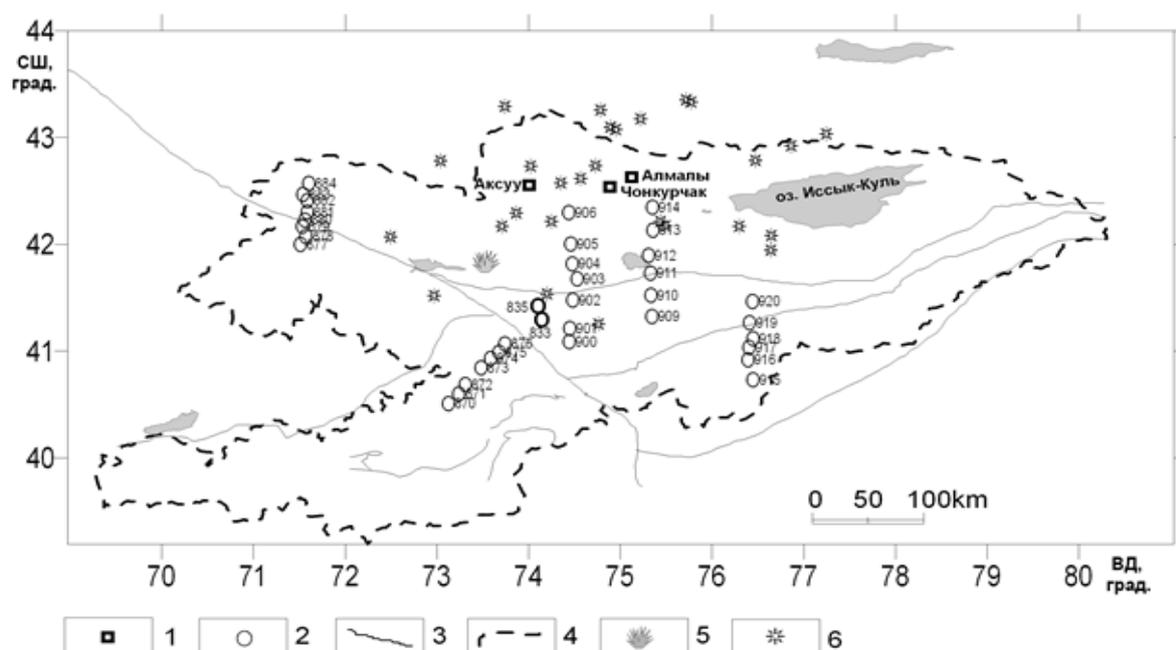


Рис. 1. Схема расположения стационарных пунктов МТ-мониторинга и ГМТЗ, выполненных на территории Центрального Тянь-Шаня в 2011 г.

1 – пункты стационарных наблюдений МТ-мониторинга, 2 – пункты ГМТЗ, 3 – региональные разломы, 4 – граница Киргизстана, 5 – Камбаратинский взрыв, 6 – сейсмические события, произошедшие за время регистрации ГМТЗ.

Для стационарных пунктов мониторинговой сети БГП были выполнены работы по изучению глубинного геоэлектрического строения полигона с помощью таких электроразведочных методов как вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), частотное зондирование (ЧЗ), зондирование становлением поля (ЗС) и магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) [9] с целью установления местоположения аномалиеобразующих объектов в геологической среде.

В исследованиях, связанных с развитием принципиально новой методики азимутального магнитотеллурического мониторинга, рассматривались временные ряды вариаций (отклонения от среднего) для электромагнитных параметров среды по азимутам  $0^\circ - 180^\circ$  в зависимости от периода зондирования [1-4, 10]. Однако при более детальном анализе временных рядов магнитотеллурического мониторинга оказалось, что представление данных в полярных диаграммах является не только более наглядным, но и может привести к принципиально другим выводам (Рис. 2).

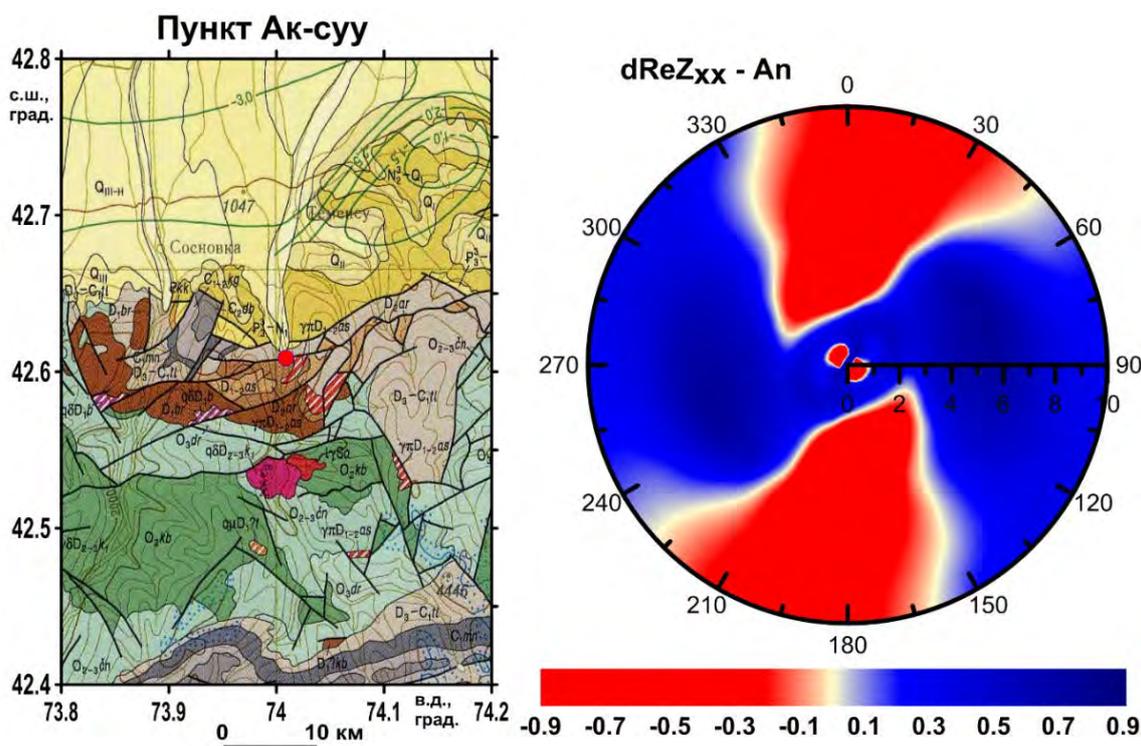


Рис. 2. Фрагмент геологической карты вблизи расположения стационарного пункта МТ-мониторинга Ак-суу (панель слева) и распределение коэффициента корреляции (панель справа) в полярных координатах, где по оси радиусов показан  $\sqrt{T}$

$Z_{xx}$  – дополнительный импеданс;  $A_n$  – вертикальная компонента приливных воздействий;  $T$  – период. Цвет и изолинии показывают значения коэффициента корреляции.

Целью настоящего исследования является развитие методики азимутального магнитотеллурического мониторинга, которое заключается в анализе полученных временных рядов электромагнитных параметров на предмет определения вклада каждой из компонент тензора импеданса в информативность мониторинговых исследований.

Для выбора наиболее чувствительных зон к изменению напряженно-деформированного состояния среды в 2011 году был выполнен эксперимент, который включал в себя 34 пункта зондирования, заложенных в совершенно различных с точки зрения геологии и тектоники условиях (Рис. 1). В результате этого эксперимента были получены оценки изменения кажущегося электрического сопротивления как отклика среды на изменение

напряженно-деформированного состояния среды, обусловленное как приливными воздействиями, так и сейсмическими событиями, произошедшими во время проведения эксперимента [1, 4].

В результате проведенного корреляционного анализа было установлено, что характер взаимосвязи наилучшим образом отражается в распределении характеристик среды на корреляционных полярных диаграммах (Рис. 2, Рис. 3). В дальнейшем полученные временные ряды электромагнитных параметров были проанализированы на предмет определения вклада каждой из компонент тензора импеданса в информативность мониторинговых исследований.

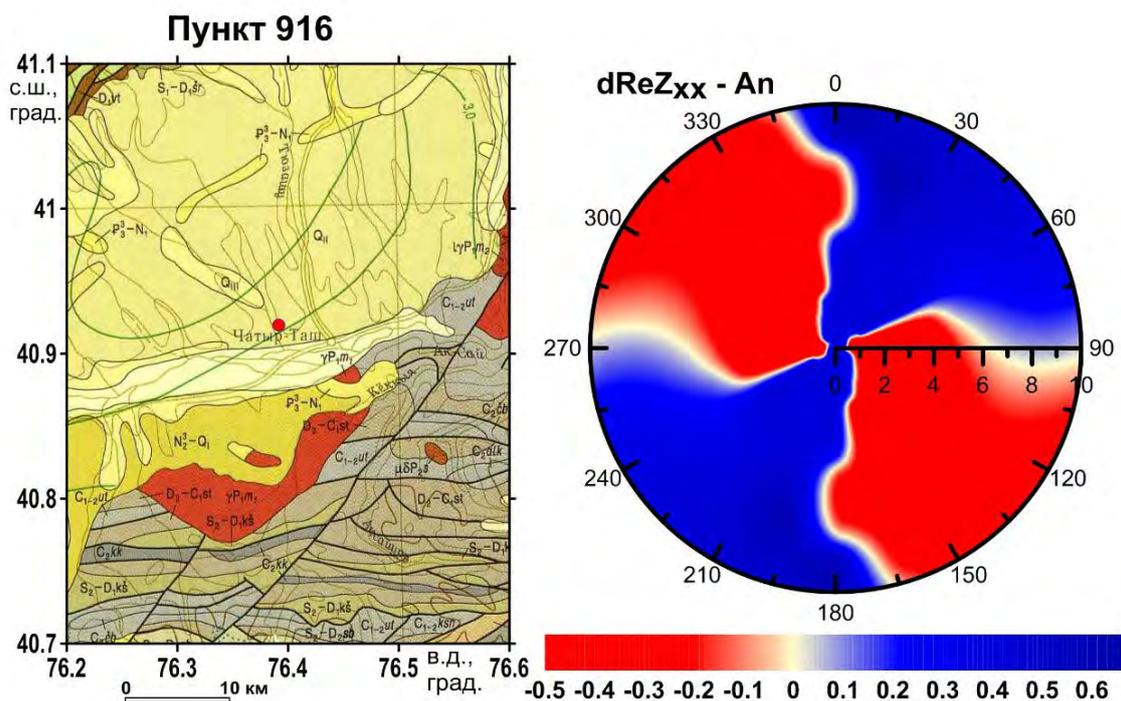


Рис. 3. Фрагмент геологической карты вблизи расположения режимного пункта МТ-мониторинга № 916 (панель слева) и распределение коэффициента корреляции (панель справа) в полярных координатах, где по оси радиусов показан  $\sqrt{T}$

$Z_{xx}$  – дополнительный импеданс;  $A_n$  – вертикальная компонента приливных воздействий;  $T$  – период. Цвет и изолинии показывают значения коэффициента корреляции.

Оказалось, что характер взаимосвязи наилучшим образом отражается в распределении характеристик среды на корреляционных полярных диаграммах (Рис. 2, Рис. 3). Наибольший интерес вызвал тот факт, что ориентация основных тектонических нарушений, закартированных вблизи пункта зондирования, находит отражение в распределении кластеров дополнительных импедансов на корреляционных полярных диаграммах. В общей сложности было проанализировано более 10 пунктов зондирования, которые расположены в непосредственной близости от зон тектонических нарушений и все разломные структуры проявились в распределении электромагнитных параметров на полярных диаграммах.

Была обнаружена устойчивая зависимость между распределением магнитовариационных параметров и простираем разломных структур, иллюстрацией чего служит рисунок 4.

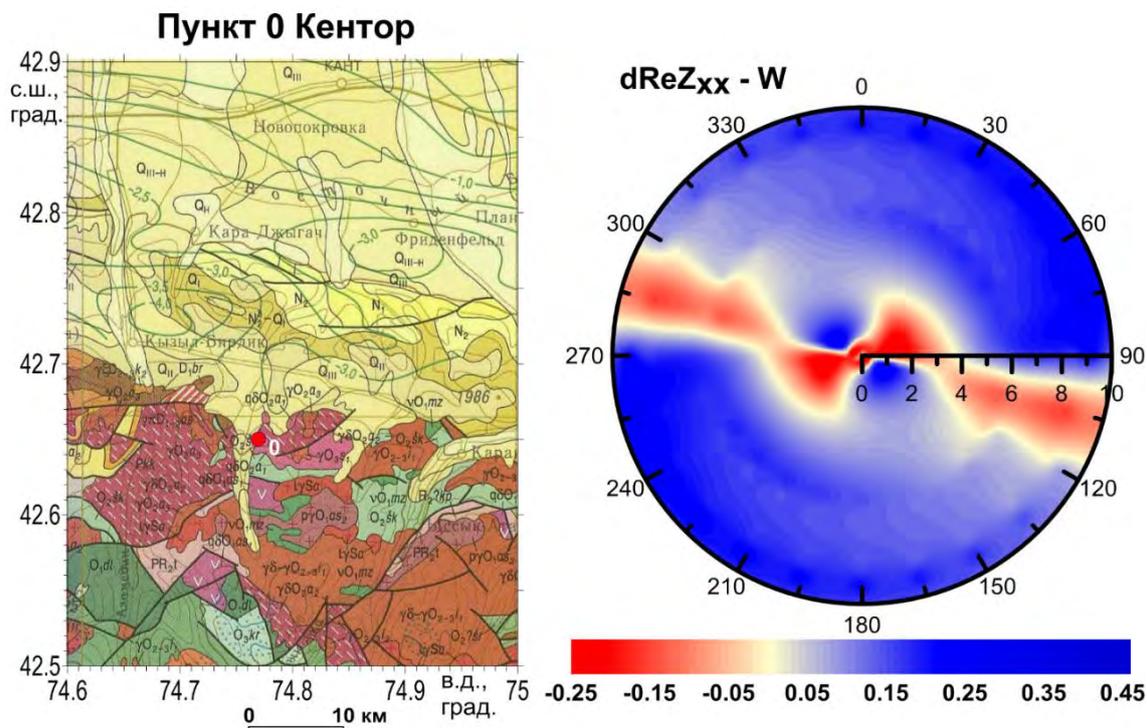


Рис. 4. Фрагмент геологической карты вблизи расположения режимного пункта МТ-мониторинга Кентор (0) (панель слева) и распределение коэффициента корреляции (панель справа) в полярных координатах, где по оси радиусов показан  $\sqrt{T}$

$W$  – вектор Визе;  $A_n$  – вертикальная компонента приливных воздействий. Цвет и изолинии показывают значения коэффициента корреляции;  $T$  – период.

Следует отметить, что в геоэлектрических построениях наиболее четко зоны тектонических нарушений проявляются до глубин порядка 20-25 километров [5, 9] и особое внимание уделялось поведению электромагнитных параметров в пунктах магнитотеллурического мониторинга, приуроченных именно к активным разломным структурам. Отчасти это связано с тем, что существует предположение о тесной взаимосвязи процессов разломообразования и сейсмичности. При этом особый интерес вызывает вопрос о процессе возникновения сейсмических событий при активизации разломов и закономерностях миграции очагов землетрясений в них.

Для анализа взаимосвязи проявления сейсмических событий в изменениях кажущегося электрического сопротивления был выполнен корреляционный анализ таких параметров как вариации кажущегося сопротивления, фазы импеданса, дополнительных импедансов и магнитовариационных параметров (векторов Визе-Паркинсона). Была сформирована выборка

землетрясений из каталога сети KNET (ИС РАН) и каталога Института сейсмологии НАН КР, в которую входили сейсмические события с  $K > 6$  и гипоцентральной дистанцией не более 100 км от пункта мониторинга за период с 2003-2014 гг. Для стационарного пункта МТ-мониторинга Ак-Суу установлено, что наибольший отклик в изменение кажущегося сопротивления вносят землетрясения, эпицентр которых расположен под азимутом в  $57^\circ$  (Рис. 5).

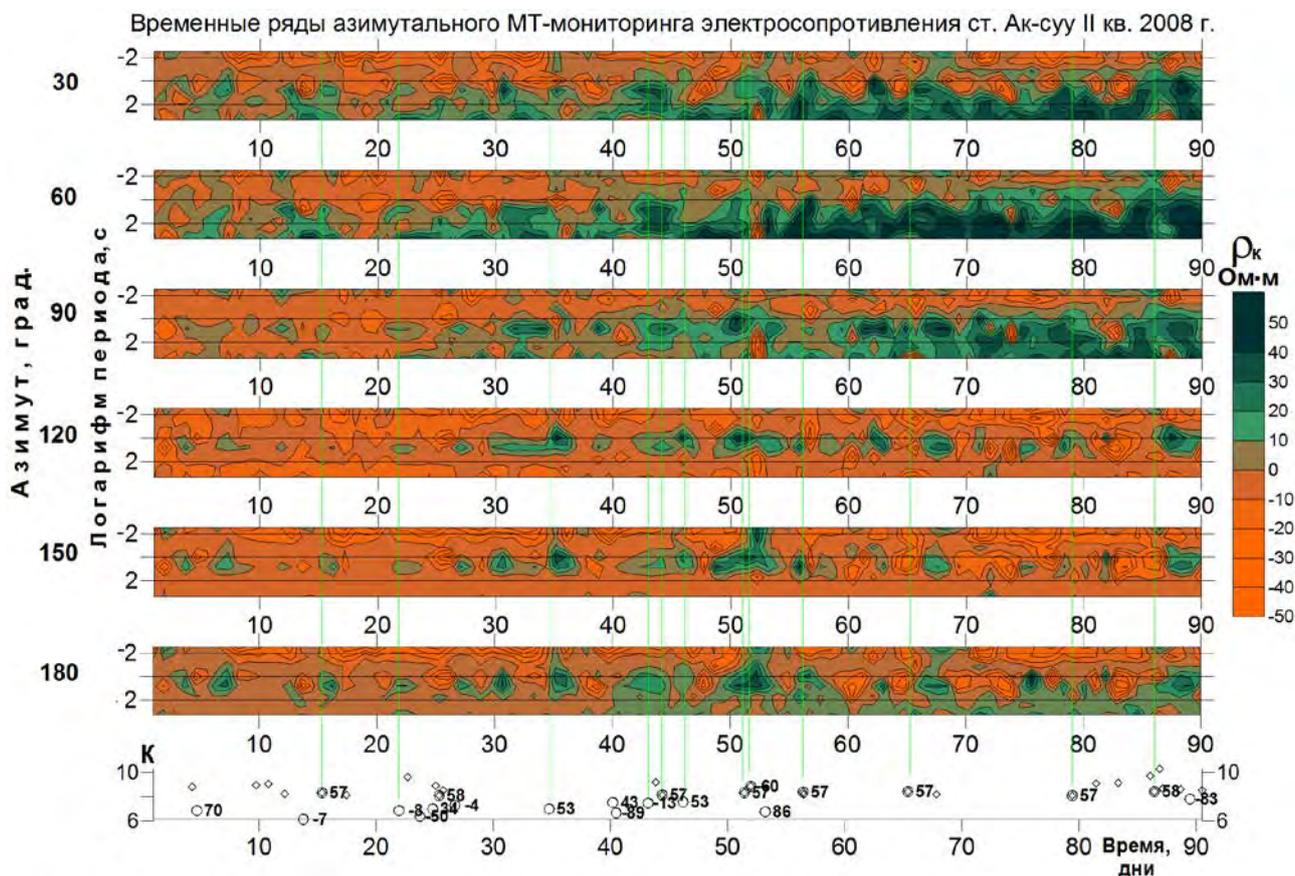


Рис. 5. Частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга кажущегося сопротивления по данным станции Ак-суу в сопоставлении с сейсмичностью за апрель, май, июнь 2008 г. на территории в радиусе от станции до 100 км – (кружки) и более 100 км (ромбы) Цифрами справа от кружков указаны азимуты от станции Ак-суу на эпицентры землетрясений.

Оценка точности выполняемых процедур производилась с использованием контрольных зондирований двумя станциями Феникс МТУ-5D в одном пункте наблюдения. Электрические диполи измерительных установок были установлены параллельно друг другу со смещением полтора метра, синхронизация зондирований осуществлялась по GPS-часам. Среднее квадратичное отклонение от среднего вариаций кажущегося сопротивления для азимутов  $-0^\circ$ - $180^\circ$  составляло не более  $1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  (0.5%) для периодов в интервале 0.1-2.5 с и до  $4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  (2%) на периодах до 100 с [10].

## Заключение

Таким образом, в результате анализа гравитационных приливных воздействий и магнитотеллурических параметров, установлено, что характер взаимосвязи зависит от геоэлектрической структуры пункта зондирования и отражается в распределении устойчивых кластеров на корреляционных полярных диаграммах. Сопоставление аномального поведения электромагнитных параметров с сейсмическим режимом БГП позволило выявить особенности аномальных изменений кажущегося электрического сопротивления и дополнительных импедансов, а также векторов Визе в зависимости от локализации гипоцентров близких землетрясений. Установлено, что ориентация основных тектонических нарушений (вблизи пункта зондирования) соответствует положению кластеров на корреляционных полярных диаграммах. Выполнена оценка информативности дополнительных импедансов, на основании чего сделан вывод о необходимости использования данного параметра для оценки тензочувствительности пунктов наблюдения.

Представленные исследования осуществляются в рамках выполнения Государственного задания ФГБУН ИС РАН в г. Бишкеке на 2015-2017 гг. (Тема 70.1).

## Список литературы:

1. Баталева Е.А. Вариации кажущегося сопротивления горных пород как индикатор напряженного состояния среды / Е.А. Баталева, А.К. Рыбин, В.Ю. Баталев // Геофизические исследования. – 2014. Т.15, №4. – С.53-64.
2. Баталева Е.А. Разработка программ анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга Часть 1. Анализ данных магнитотеллурического мониторинга / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев // Вестник КРСУ. – 2014. Т.14, №7. – С. 3-7.
3. Баталева Е.А. Разработка программ анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга Часть 2. Разработка программного обеспечения для анализа данных МТ мониторинга / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев // Вестник КРСУ. – 2014. Т.14, №7. – С. 8-12.
4. Баталева Е.А. К вопросу о взаимосвязи вариаций электропроводности земной коры и геодинамических процессов / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев, А.К. Рыбин // Физика Земли. – 2013. № 3. – С.105-113.
5. Баталева Е.А. Аномалии электропроводности зоны Таласо-Ферганского разлома и геодинамическая интерпретация глубинной структуры юго-западного Тянь-Шаня / Е.А. Баталева, М.М. Буслов, А.К. Рыбин, В.Ю. Баталев, И.В. Сафронов // Геология и геофизика. – 2006. – № 9. – С.1036-1042.
6. Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Щелочков Г.Г., Баталева Е.А., Сафронов И.В. Глубинные электромагнитные исследования в Тянь-Шане – достигнутые возможности и перспективы для проведения мониторинговых магнитотеллурических наблюдений // в сборнике: Проблемы предотвращения последствий разрушительных землетрясений. - Алматы, Эверо, 2003. - С.284-291.
7. Рыбин А.К., Сафронов И.В., Щелочков Г.Г., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Фокс Л., Ингеров А. О магнитотеллурическом мониторинге на Бишкекском геодинамическом полигоне // В сборнике: материалы международной конференции «Проблемы сейсмологии III-тысячелетия», (Новосибирск, 15-19 сентября 2003 года) – Новосибирск, 2003. – С. 249-254.

8. Рыбин А.К. Электромагнитный мониторинг в Северо-Тянь-Шаньской сейсмогенной зоне / Рыбин А.К., Брагин В.Д., Баталева Е.А., Баталев В.Ю., Матюков В.Е. // В сборнике: Проблемы современной сейсмогеологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии. – Иркутск, 2007. – С.125-130.

9. Рыбин А.К. Площадные магнитотеллурические зондирования в сейсмоактивной зоне Северного Тянь-Шаня / А.К. Рыбин, В.В. Спичак, В.Ю. Баталев, Е.А. Баталева, В.Е. Матюков // Геология и геофизика. – 2008. №5. – С. 445-460.

10. Рыбин А.К. Вариации электросопротивления земной коры по результатам магнитотеллурического мониторинга сейсмоактивных зон Тянь-Шаня / А.К. Рыбин, Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев, В.Е. Матюков // Вестник КРСУ. – 2011. Том 11, № 4. – С. 29-40.

УДК 551.248.2+ 551.23 (235.222)

## **ЧЕТВЕРТИЧНЫЕ ТРАВЕРТИНЫ КУРАЙСКОЙ ЗОНЫ РАЗЛОМОВ (ГОРНЫЙ АЛТАЙ): ЛИТОТИПЫ, ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

**<sup>1</sup>Ряполова Ю.М., <sup>1,2</sup>Деев Е.В., <sup>3</sup>Сокол Э.В., <sup>3</sup>Кох С.Н., <sup>4</sup>Русанов Г.Г.**

<sup>1</sup>*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2, e-mail: ulka1991@mail.ru*

<sup>2</sup>*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск 630090, пр-т Академика Коптюга, 3, e-mail: deeev@ngs.ru*

<sup>3</sup>*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, 630090, пр-т Академика Коптюга, 3, e-mail: sokol@igm.nsc.ru*

<sup>4</sup>*ОАО «Горно-Алтайская экспедиция», Алтайский край, с. Малоенисейское, 659370, ул. Советская, 15, e-mail: gapse@mail.biysk.ru*

Травертины образуют серию компактных полей вдоль Курайской зоны разломов. Травертины состоят в основном из кальцита и арагонита с небольшими включениями опала, голяцита, фторapatита и доломита. Фазовый состав травертинов указывает на их формирование из низкотемпературных растворов, характеризующихся высокой концентрацией F, Y, Sr, U, V, Ni, As, Zn. Морфология агрегатов CaCO<sub>3</sub> и минеральный состав показывают, что формирование алтайских травертинов происходило путем кристаллизации кальцита и арагонита из насыщенных растворов в квазиравновесных условиях ниже зоны почвообразования. Изотопные характеристики O ( $\delta^{18}\text{O} = -11.8 \div -14.8 \text{‰}$ , PDB) и C ( $\delta^{13}\text{C} = -2.2 \div +1.6 \text{‰}$  PDB) карбонатов кальция указывают на смешанный источник CO<sub>2</sub> и эндогенный источник кислорода, задействованных в образовании травертинов. Изученные травертины можно подразделить на два типа на основе геохимических особенностей карбонатов и связать их с разными этапами позднечетвертичной активизации разломов.

Ключевые слова: травертины, Курайская зона разломов, активные разломы, петрография, геохимия, изотопия углерода и кислорода, Горный Алтай.

## **QUATERNARY TRAVERTINES AT THE KURAI FAULT ZONES (GORNYY ALTAI): LITHOTYPES, PETROGRAPHY, AND GEOCHEMICAL DATA**

**<sup>1</sup>Ryapolova Yu.M., <sup>1,2</sup>Deev E.V., <sup>3</sup>Sokol E.V., <sup>3</sup>Kokh S.N., <sup>4</sup>Rusanov G.G.**

<sup>1</sup>*Novosibirsk State University, 2 P irogova str., Novosibirsk, 630090, Russia, e-mail: ulka1991@mail.ru*

<sup>2</sup>*Trofimuk Institute for Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, pr. Akademika Koptyuga 3, Novosibirsk, 630090 Russia, e-mail: deeev@ngs.ru*

<sup>3</sup> Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, pr. Akademika Koptyuga 3, Novosibirsk, 630090 Russia, e-mail: sokol@igm.nsc.ru<sup>4</sup>Gorny Altai Expedition, ul. Sovetskaya 15, Maloeniseiskoe, Biysk raion, Altai krai, 659370, Russiae-mail: gapse@mail.biysk.ru

**A series of compact travertine bodies are located along Kurai fault zone (Gorny Altai). The travertine is composed mainly of aragonite and calcite with minor amounts of opal, goyazite, fluorapatite, and dolomite. Phase composition of travertine suggests their relation to low-temperature hydrothermal solutions characterized by high concentrations of F, Y, Sr, U, Ni, V, As, and Zn. The morphology of the CaCO<sub>3</sub> aggregates and mineralogical composition indicate that the formation of the Altai travertine was mostly due to steady-state crystallization of aragonite and calcite under subsurface condition. The O ( $\delta^{18}\text{O} = -11.8 \div -14.8 \text{‰}$ , PDB) and C ( $\delta^{13}\text{C} = -2.2 \div +1.6 \text{‰}$  PDB) values of the travertine carbonates indicate mixing of different CO<sub>2</sub> sources and thermogene origin of oxygen for the travertine formation. The studied travertine is subdivided into two type based on geochemical signatures of carbonates. Thus, the detailed mineralogical and geochemical study of travertine in the Kurai fault zone have provided evidence that two travertine types precipitated in the course of different episodes of quaternary tectonic events.**

Keywords: travertine, Kurai fault zone, active fault, petrography, geochemistry, carbon and oxygen stable isotopes, Gorny Altai.

## **Введение**

Травертины и/или известковые туфы, в большинстве своем, образуются в результате хемогенного осаждения из термальных или холодных вод, обогащенных углекислотой. По источнику углекислоты травертины разделяют на два класса: метеогенные и термогенные [7]. Травертины первой группы особенно важны для палеоклиматических реконструкций. Травертины второй группы имеют глубинный источник углекислоты, а их проявления известны во многих современных тектонически активных областях. В таких регионах процессы миграции обогащенных углекислотой вод и формирование травертиновых полей увязывают с гидротермальной и палеогидротермальной активностью разломов и зон, повышенной трещиноватости.

В Горном Алтае травертины впервые отмечены А.С. Мухиным в 1934 г. при описании геологического строения Курайской зоны ртутного оруденения, приуроченной к одноименной зоне разломов. К настоящему времени они установлены на склонах хребтов Юго-Восточного и Центрального Алтая, в зонах их сочленения с Чуйской, Курайской и Уймонской межгорными впадинами, в тектонических озерных котловинах и речных долинах северо-западной, северной и северо-восточной частей Горного Алтая [1, 3].

Цель представляемого исследования - выявить литотипы, петрографические и геохимические характеристики травертинов в пределах Курайской зоны разломов, а также

реконструировать процессы их формирования и связь с неотектоническими разрывными нарушениями.

В ходе работы были проведены комплексные исследования карбонатного травертинового материала из 7 локальных полей, расположенных вдоль Курайской зоны разломов (Рис. 1). Эти исследования включали: геологическую характеристику обнажений, петрографическое изучение карбонатного материала с использованием оптической и электронной микроскопии, анализ химического и микроэлементного состава минералов с применением микрозонда и методом РФА-СИ анализа, изучение изотопии углерода и кислорода, определение ртути методом атомной абсорбции.

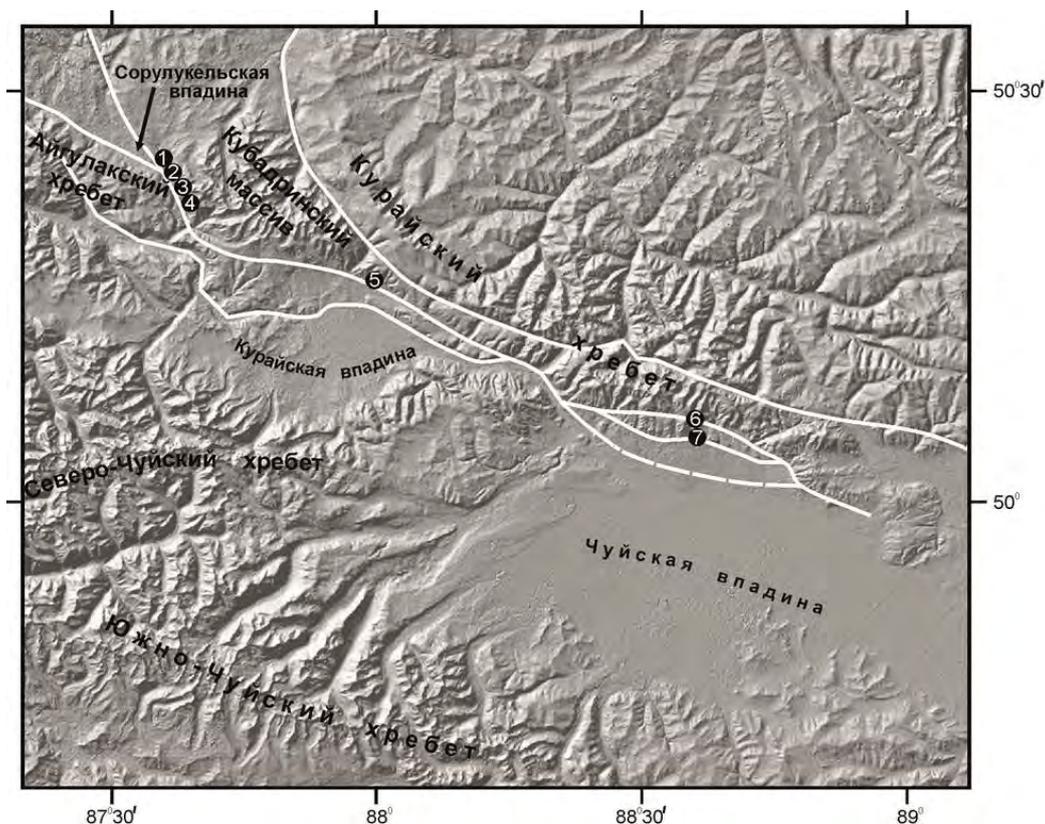


Рис. 1. Положение Курайской зоны разломов в орографической структуре

Подложка – оттененный рельеф района исследований. Белые сплошные линии – основные кайнозойские разломы, выявленные по геоморфологическим, геологическим и геофизическим данным. Номера в черных кругах – исследованные поля травертинов.

### Результаты исследований

В Курайскую зону разломов авторы объединяют субширотные Курайский, Бугузунский, Кубадринский разломы, южные окончания Кадринского и Телецкого разломов северо-западного и субмеридионального простирания [5]. Разломы этой зоны имеют длительную палеозойско-мезозойскую историю формирования. На неотектоническом этапе они контролируют положение северных бортов двух крупных межгорных впадин – Чуйской и Курайской. При этом разломы хорошо выражены в современном рельефе (см. Рис. 1), а

четвертичные движения по ним фиксируются пликативными и дизъюнктивными деформациями неогеновых и раннечетвертичных отложений, первичными и вторичными палеосейсмодислокациями, землетрясениями, регистрируемыми инструментальной сетью. Еще одним свидетельством активности этих разломов могут быть расположенные вдоль них поля травертинов, которые могли сформироваться при гидротермальных процессах.

В пределах полей, приуроченных к Курайской зоне разломов, было выявлено 3 основных литотипа травертинов: цементы, корочки, штокверкоподобные образования. Доминируют микро- и мелкозернистые минеральные агрегаты с отчетливо различимыми минеральными индивидами. Наиболее обычны параллельно-шестоватые (ониксоподобные) и радиально-лучистые (в том числе) сферолитовые агрегаты кальцита и арагонита, регулярно обнаруживается друзовый кальцит. Сливные мелкозернистые агрегаты встречаются редко. Микритовые и спаритовые разновидности карбонатов, характерные для кристаллизационных процессов на испарительном барьере при высоких пересыщениях растворов, обнаружены не были. Травертины инкрустируют поверхность и цементируют обломки пород в материале коллювиальных осыпей и морен, заполняют свободное пространство между ними.

Исследования на сканирующем микроскопе выявили присутствие в ассоциациях травертинов разнообразных минералов низкотемпературных гидротермалитов, сингенетичных с карбонатами. Это опал, фторапатит, Fe-доломит и редкий минерал – гояцит.

Опал как акцессорная фаза рос синхронно с Mg-кальцитом. Он образует отдельные микростяжения (размером в десятки мкм), или (реже) цепочки таких стяжений (длиною в сотни мкм) в массе Mg-кальцита или по трещинам в нем. Важно отметить, что самостоятельные прослои опала в алтайских травертинах обнаружены не были. Единичные микроразрастания гояцита обнаружены вместе с опалом в травертинах двух полей. Он относится к фтористой разновидности и, с высокой вероятностью, может представлять собой новый минеральный вид.

Особенностью травертинов Курайской зоны разломов также является отсутствие фоссилизированных фрагментов растительности и/или микробиальных сообществ, что указывает на их формирование значительно глубже почвенного горизонта.

Микрозондовые исследования карбонатов выявили, что ранний карбонат кальция – кальцит – неизменно обогащен MgO (2-4 мас. %) и содержит микропримеси Na, Fe, Sr. При этом он обеднен Mn и Ba. Поздняя генерация CaCO<sub>3</sub> представлена арагонитом, неизменно обогащена Sr (SrO – 0.8-1.5 мас. %) и содержит примеси Ba, тогда как содержания в нем Na<sub>2</sub>O, FeO, MnO ниже предела обнаружения микрозондового анализа (менее 0.02 мас. %). Отличительной особенностью арагонитов из травертинов Курайской зоны также является их значимое обогащение иттрием (до 0.4 мас. % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Закономерная смена состава растворов в

ходе формирования травертиновых полей Курайской зоны, в частности, их обогащение Sr, привело к тому, что вместо стабильного кальцита на поздних стадиях травертинообразования происходила кристаллизация метастабильного арагонита, стабилизацию которого обеспечило изоморфное замещение  $\text{Ca}^{2+}$  на  $\text{Sr}^{2+}$ .

Для определения содержаний петрогенных элементов и микроэлементного состава травертинов методом РФА СИ под бинокулярным микроскопом вручную выбирался наиболее чистый карбонатный материал. Отсутствие в нем примесей терригенной компоненты или иного силикатного материала подтверждает низкое содержание во всех изученных пробах K ( $\leq 0.26$  мас. %), Ti ( $\leq 15-90$  ppm), Rb (0.4-12 ppm), Zr (2.5-79 ppm).

В целом микроэлементный состав всех травертинов этой зоны достаточно бедный. Содержания V, Cr, Cu, Br, Rb, Ga, Ge, Se, Nb, и Mo не превышают 12 ppm и не демонстрируют каких-либо закономерностей в накоплении в пробах с различных участков, их концентрации варьируют случайным образом. Содержания Ni варьируют значительно (4-38 ppm), в том числе и в пределах одного поля. Содержания иттрия изменяются почти на 3 порядка (0.3-19.4 ppm) без очевидной связи с другими элементами или местом локализации травертиновых тел.

На этом фоне распределение Sr, U, Zn, Pb и Hg в травертинах демонстрирует отчетливые различия для полей северо-западной и юго-восточной локализации.

Травертины 1-5 полей в целом достоверно богаче Sr (338-7281 ppm) в сравнении с образцами 6 и 7 полей (Sr 184-516 ppm), что существенным образом влияет на их фазовый состав. Травертины 1-5 полей содержат обильный Sr-арагонит, тогда как травертины 6 и 7 полей преимущественно (или целиком) кальцитовые.

Отдельные тела травертинов в пределах 1, 3-5 полей достоверно обогащены U (15-38 ppm), тогда как его содержания в прочих пробах не превышают предела обнаружения  $\leq 1$  ppm.

Травертины 7 поля резко обогащены Zn (216-298 ppm) в сравнении со всеми прочими пробами из района Курайского разлома. Содержания Zn в травертинах северо-западного участка (поля 1-5) составляют 3-11 ppm. Все проанализированные пробы бедны свинцом (0.9-6.2 ppm), однако в травертинах 7 поля его содержания максимальны (4.6-6.2 ppm).

Концентрации Mn в валовых пробах большинства травертинов находятся в интервале 10-40 ppm, достигая величин 130-230 ppm в единичных пробах в пределах 2 и 7 полей. Содержания Fe зачастую варьируют от 110 до 390 ppm, достигая 810-2500 ppm в образцах 1 и 2 полей. Гидроксиды Fe и/или Mn при анализе образцов методом SEM обнаружены не были.

По изотопному составу углерода карбонатов ( $\delta^{13}\text{C} = -2.2 \div +1.6$  ‰ PDB) травертины Курайской зоны занимают промежуточное положение между термогенными и метеогенными, по общепринятой классификации [7], что указывает на смешанный источник  $\text{CO}_2$ , задействованный в карбонатообразовании. При этом резко облегченный изотопный состав

кислорода ( $\delta^{18}\text{O} = -11.8 \div -14.8 \text{ ‰}$ , PDB) позволяет назвать седиментационные воды ранней диагенетической стадии в качестве главного источника кислорода новообразованных карбонатов.

Концентрации Hg, определенные методом атомной абсорбции в валовых пробах, варьируют очень широко (от  $<0.001 \text{ ppm}$  до  $0.665 \text{ ppm}$ ). Наибольшие концентрации обнаружены в травертинах 2 поля, высокие – в травертинах 7 поля. При этом разброс содержаний Hg в различных телах в пределах одного поля достигает 1.5 порядков (поле 2). Малочисленность изученной выборки, а также анализ материала через год после пробоотбора позволяет использовать их только для предварительных выводов.

### **Обсуждение результатов и выводы**

В ходе проведенных исследований установлено, что травертины состава  $\text{CaCO}_3$  образуют серию компактных полей вдоль Курайской зоны разломов. Выделено три основных литотипа травертинов: цементы, натечные корочки и штокверковые образования.

Как следует из петрографических и геохимических характеристик травертинов, кальцит-арагонитовые тела и цементы, обнаруженные в Курайской зоне разломов, характеризуются устойчивой повторяемостью морфологических характеристик слагающих их карбонатов, а также сменой в составе зональных агрегатов стабильного Mg-кальцита метастабильным Sr-содержащим арагонитом. Обилие сферолитов, регулярное присутствие «ониксов» и иных ритмически-зональных и радиально-лучистых образований указывает на рост минеральных индивидов из пересыщенных растворов [2].

Минералогия травертинов, а также изотопные характеристики O и C карбонатов кальция согласованно указывают на эндогенный источник кислорода (воды ранней диагенетической стадии) и смешанный источник  $\text{CO}_2$  (метеогенная и термогенная компоненты), задействованных в образовании  $\text{CaCO}_3$ . От эндогенных источников эти воды унаследовали обогащение F, Y, Sr, U, (а также на отдельных площадях Ni, V, As, Zn). Эти геохимические «метки» затем были сохранены кальцитом и арагонитом травертинов. Присутствие в травертинах сингенетичных с ними фторапатита, F-гояцита и опала позволяет квалифицировать эти воды как низкотемпературные гидротермальные растворы повышенной щелочности. Свидетельств участия метеорных вод в образовании травертинов Курайской зоны разломов не обнаружено.

Фазовый состав и анатомия минеральных агрегатов, слагающих травертины КЗР, свидетельствуют, что рост Mg-кальцита и/или Sr-арагонита происходил из насыщенных растворов в квазиравновесных условиях на глубинах, расположенных ниже зоны почвообразования и сезонных вариаций температуры. На это указывает и отсутствие в их структуре самостоятельных опаловых микроритмов (образующихся в зимний период),

чередующихся с ритмами  $\text{CaCO}_3$  (образующихся в летний период). Такие колебания фазового состава обусловлены обратной растворимостью  $\text{CaCO}_3$  и весьма характерны, в частности, для современных травертинов из областей с субарктическим климатом – Исландии и Британской Колумбии [6]. Также следует подчеркнуть низкие содержания Mn в валовых пробах всех изученных травертинов. В комплексе с изотопными характеристиками карбонатов и отсутствием минеральных псевдоморфоз по органическим остаткам, эта геохимическая особенность позволяет исключить их родство с почвенными карбонатным и новообразованиями типа каличе.

Однотипные геохимические особенности травертинов 1, 3, 4 и 5 полей (обогащение Sr, Y, Ni, V, U) указывает на единый источник растворов, из которых осуществлялся их рост, и вероятную синхронность формирования травертиновых полей на расстоянии около 35 км в обрамлении Кубадринского массива. Индивидуальные геохимические характеристики травертинов 2 и 7 полей указывают на их образование при участии растворов иного состава. Эти факты позволяют предполагать несколько эпизодов активизации Курайской разломной зоны, сопровождавшихся травертинообразованием.

Поскольку травертины Курайской зоны цементируют позднеплейстоцен-голоценовые отложения, а оценочные радиоуглеродные датировки карбонатного материала укладываются в диапазон от  $> 40\,000$  до  $3475 \pm 35$  лет [1, 3-4], соответствующие разломы, служившие путями миграции травертинообразующих растворов, следует рассматривать в качестве активных структур.

*Исследования выполнены при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-05-00054\_а.*

### **Список литературы**

1. Бутвиловский В.В. Палеогеография последнего оледенения и голоцена Алтая: событийно-катастрофическая модель. – Томск: ТГУ, 1993. – 252 с.
2. Григорьев Д.П. Онтогенез минералов. – Львов: ИЛУ, 1961. – 284 с.
3. Русанов Г.Г., Орлова Л.А. Радиоуглеродные датировки (СОАН) Горного Алтая и Предальтайской равнины. – Бийск: ФГБОУ ВПО «АГАО», 2013. – 291 с.
4. Русанов Г.Г., Деев Е.В., Ряполова Ю.М., Зольников И.Д. Палеогидротермальная активность разломов Горного Алтая по результатам датирования травертинов // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2013. – № 4 (16). – С. 53-64.
5. Туркин Ю.А., Федак С.И. Геология и структурно-вещественные комплексы Горного Алтая. – Томск: STT, 2008. – 460 с.
6. Jones B., Renaut R.W. Cyclic development of large, complex calcite dendrite crystals in the Clinton travertine, Interior British Columbia, Canada // Sedimentary Geology, – 2008. Vol. 203. P. 17–35.
7. Pentecost A. Travertine. – Berlin: Springer-Verlag, 2005. – 446 p.

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО ЭФФЕКТА ПО ОТНОШЕНИЯМ АКТИВНОСТЕЙ $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ НА ПРОФИЛЕ ИРКУТСК–БАЙКАЛ**

**<sup>1,2</sup>Рассказов С.В., <sup>1,3</sup>Чебыкин Е.П., <sup>1</sup>Ильясова А.М., <sup>1,2</sup>Чувашова И.С., <sup>1,3</sup>Воднева Е.Н., <sup>1</sup>Семинский А.К.**

<sup>1</sup>*Институт земной коры СО РАН, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 128, rassk@crust.irk.ru*

<sup>2</sup>*Иркутский государственный университет, 664003 Иркутск, ул. Ленина, 3*

<sup>3</sup>*Лимнологический институт СО РАН, 664033 Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3*

Исследованы вариации отношений активностей  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  в подземных водах на профиле Иркутск–Байкал, пересекающем четвертичные отложения в зоне Ангарского разлома, юрские и рифей-венд-кембрийские отложения осадочного чехла Сибирской платформы, архейский фундамент, шовную зону между фундаментом Сибирской платформы и Слюдянским метаморфическим субтеррейном Хамардабанского террейна и Слюдянский субтеррейн. Деформационная составляющая в отношениях активностей  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  регистрируется при мониторинге подземных вод из Ангарского разлома, минеральных вод из Олхинской скважины в кембрийских отложениях и подземных вод Култукского геодинамического полигона.

Ключевые слова: подземные воды, Байкал, отношение активностей  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ , деформации

## **IDENTIFICATION OF THE DEFORMATIONAL EFFECT BY $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ACTIVITY RATIOS IN GROUNDWATER FROM THE IRKUTSK–BAIKAL PROFILE**

**<sup>1,2</sup>Rasskazov S.V., <sup>1,3</sup>Chebykin E.P., <sup>1</sup>Ilyasova A.M., <sup>1,2</sup>Chuvashova I.S., <sup>1,3</sup>Vodneva E.N., <sup>1</sup>Seminsky A.K.**

<sup>1</sup>*Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, 664033 Irkutsk Lermontov str., 128, e-mail: rassk@crust.irk.ru*

<sup>2</sup>*Irkutsk State University, 664033 Irkutsk, Lenin str., 3*

<sup>3</sup>*Limnological Institute, 664033 Irkutsk, Ulan-Bator str., 3*

Variations of activity ratios  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  in groundwater along the Irkutsk–Baikal hydro-isotopic profile that crosses the Quaternary sediments of the Angara fault zone, Jurassic and Vendian-Cambrian sedimentary cover of the Siberian platform, Archean basement of the platform, suture zone between the platform basement and Slyudyanka metamorphic sub-terrane of the Khamar-Daban terrane, and the Slyudyanka sub-terrane has been studied. The deformational components in terms of  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  activity ratios are registered in the monitoring stations of groundwater from the Angara fault, mineral water Olkha drill hole in the Cambrian sediments, and groundwater of the Kultuk geodynamical polygon.

Keywords: groundwater, Baikal, activity ratio  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ , deformation

## Введение

Циклическое равновесие отношения активностей  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} - (^{234}\text{U}/^{238}\text{U}) \approx \gamma \approx 1$  – соответствует атомному отношению  $\approx 5,47 \times 10^{-5}$ . Нарушение равновесия изотопов U связано с эффектами Сзиланда–Чалмерса и Чалова–Чердынцева. Первый эффект обусловлен аномальным химизмом среды, второй – деформациями горных пород. К примеру, эффект Сзиланда–Чалмерса проявлен в аномально высоких значениях ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ), связанных с составом геологических объектов. Например, в окаменелостях раковин и костях значения этого параметра достигают 243,8, в горячих источниках Татсунокучи (Tatsunokuchi), Япония находятся в интервале 2,7–51 и в холодной воде на острове Сааремаа (Эстония) составляют 54 [Tokarev et al., 2006]. Деформационный отклик на крупное сейсмическое событие регистрировался 10-кратным возрастанием ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) в подземных водах Грузии [Зверев и др., 1975]. Другой деформационный отклик проявился в процессе подготовки сейсмического события в горячих водах источника города Ниланд, США. В течение года фиксировалось понижение концентраций U от 0,013 до 0,0055 мкг/л и возрастание ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) от 2,6 до 4,5. Через 11 дней после начального толчка концентраций U были превышены шестикратно (до 0,044 мкг/л) и ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) трехкратно (до 1,5) [Finkel, 1981].

Химические и деформационные эффекты могут проявиться в вариациях ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) одновременно. Идентификация эффектов требует проведения наблюдений пространственных и временных вариаций этого параметра и концентраций U в подземных водах территорий. В настоящей работе мы приводим результаты систематического изучения изотопного состава U в подземных водах по профилю Иркутск–Байкал и идентифицируем участки проявления деформационных эффектов. Методика определений ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) приведена в работе [Чебыкин и др., 2015].

### Геологический фон, смена состава U вдоль гидроизотопного профиля

Гидроизотопный профиль протягивается в субмеридиональном направлении на 110 км. Северную часть профиля составляют породы осадочного чехла Сибирской платформы – плиоцен-четвертичные и юрские осадочные отложения в районе города Иркутск, рифей-венд-кембрийские отложения участков Олха, Большой Луг, Шаманка и Худяково. Центральной части профиля соответствует полоса пород Шарыжалгайского выступа фундамента Сибирской платформы Олхинского плато и района пос. Листвянка. Южная часть профиля представлена породами шовной зоны, отделяющей фундамент платформы от Слюдянского метаморфического субтеррейна Хамардабанского террейна в районе пос. Култук, и породами Слюдянского метаморфического субтеррейна в районе города Слюдянка (Рис. 1). На участках профиля существенно меняются и концентрации U, и отношения активностей  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  подземных вод (табл. 1).

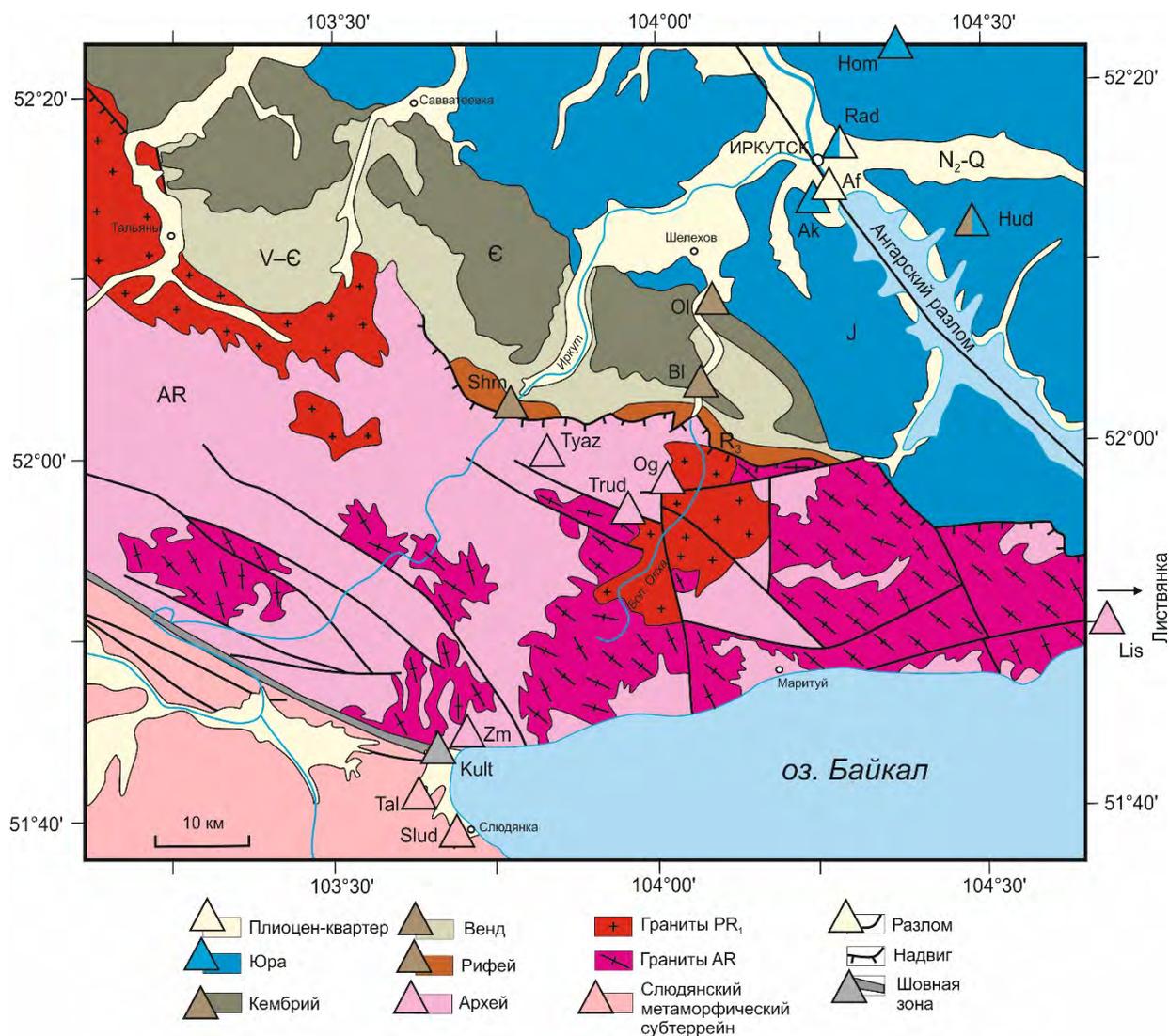


Рис. 1. Схема распределения станций опробования на гидроизотопном профиле Иркутск–Байкал

Условным обозначением разновозрастных пород соответствуют обозначения мест опробования подземных вод (треугольники цвета стратиграфического подразделения): из четвертичных отложений - Ангарский разлом (Af); из юрских отложений – Хомутово (Hom), Радищево (Rad), Академгородок и другие районы левобережья р. Ангара (Ak); из отложений рифея, венда и кембрия – Худяково (Hud), Олха (Ol), Большой Луг (Bl), Шаманский мыс (Shm); из фундамента платформы – Тешин Язык (Tyaz), Огоньки (Og), Трудный (Trud), Земляничный (Zm), Листвянка (Lis); из шовной зоны между фундаментом Сибирской платформы и Слюдянским метаморфическим субтеррейном – Култук (Kult); из Слюдянского субтеррейна – Слюдянка (Slud), Талая (Tal).

В водах из юрских терригенных отложений с пластами углей на правобережье и левобережье р. Ангара концентрации U находятся в одном диапазоне (0,2–0,86 мкг/л) при более высоком ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) на правобережье (1,99–2,21), чем на левобережье (1,38–1,73). В родниковых водах из Ангарского разлома, рассекающего юрские и дренирующего четвертичные преимущественно галечниковые отложения, повышаются и концентрации U (до интервала 2,8–6,9 мкг/л) и отношения активностей  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  (до 2,07–2,50).

Диапазоны ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) и концентраций U на участках профиля Иркутск–Байкал

Участок	Породы	Концентрация U, мкг/л		$(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})$	
		min	max	min	max
Правобережье р. Ангара	Юрские отложения	0,2 [0,0063]	0,83	1,99	2,21
Ангарский разлом	Четвертичные отложения	2,8	6,9	2,07	2,50
Левобережье р. Ангара	Юрские отложения	0,44	0,86	1,38	1,73
Олха, Худяково	Рифей-венд-кембрийские отложения	0,01	1,37	2,20	14,95
Олхинское плато	Архейский фундамент	0,046	15	1,53	2,44
Листвянка	Архейский фундамент	0,25	2,8	1,06	1,98
Култук	Шовная зона	0,0087	3,8	1,09	3,29
Слюдянка	Метаморфический субтеррейн	0,25	0,41	1,23	1,45

Примечание: минимальные концентрации U в квадратных скобках – аномальные значения, полученные для близповерхностных вод.

В участках рифей-венд-кембрийских отложений, включающих конгломераты, песчаники, алевролиты, доломиты и известняки с гипсом, ангидритом и пластами каменной соли общий диапазон ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) в подземных водах составил 2,20–14,95, диапазон концентраций U – 0,01–1,37 мкг/л. На Шарыжалгайском выступе фундамента Сибирской платформы, сложенном гнейсами, амфиболитами и гранитами, выявлены существенные отличия изотопной систематики урана в водах западной части территории (Олхинское плато) и в восточной (пос. Листвянка). Для подземных вод из пород фундамента на Олхинском плато получен интервал ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) от 1,53 до 2,44 и интервал концентраций U от 0,046 до 15 мкг/л, для подземных вод пос. Листвянка – интервал ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) от 1,06 до 1,98 и интервал концентраций U от 0,25 до 2,8 мкг/л. В водах разных станций Култукского полигона, дренирующих милониты шовной зоны, интервалы концентраций U составили от 0,0087 до 3,8 мкг/л и величин ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) от 1,09 до 3,29. В водах Слюдянского метаморфического террейна диапазоны концентраций U и ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) были ограничены, соответственно, интервалами 0,41–0,25 мкг/л и 1,23–1,45.

**Деформационный отклик изотопного состава урана**

В ряду наблюдений родника ст. 50 левобережья р. Ангара 06.12.2012–14.01.2014 концентрации U снижались от 0,59 до 0,44 мкг/л. Диапазон ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) на этой станции опробования составил интервал 1,36–1,41. Серия родников р-нов Университетский и Первомайский г. Иркутска на диаграмме ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) – 1/U дала общий линейный тренд от точки ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) = 1,53, 1/U = 0,17 до точки ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) = 1,73, 1/U = 8,33. Субпараллельно вытянут тренд вод родника ст. 50 при пониженных отношениях ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ). Эти тренды определяются

главным образом вариациями ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) и отличаются от групп точек родников из Ангарского разлома (ст. 3с-24 и 23), для которых свойственны заметные вариации обратных концентраций U, согласующиеся со слабыми вариациями ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) (Рис. 2).

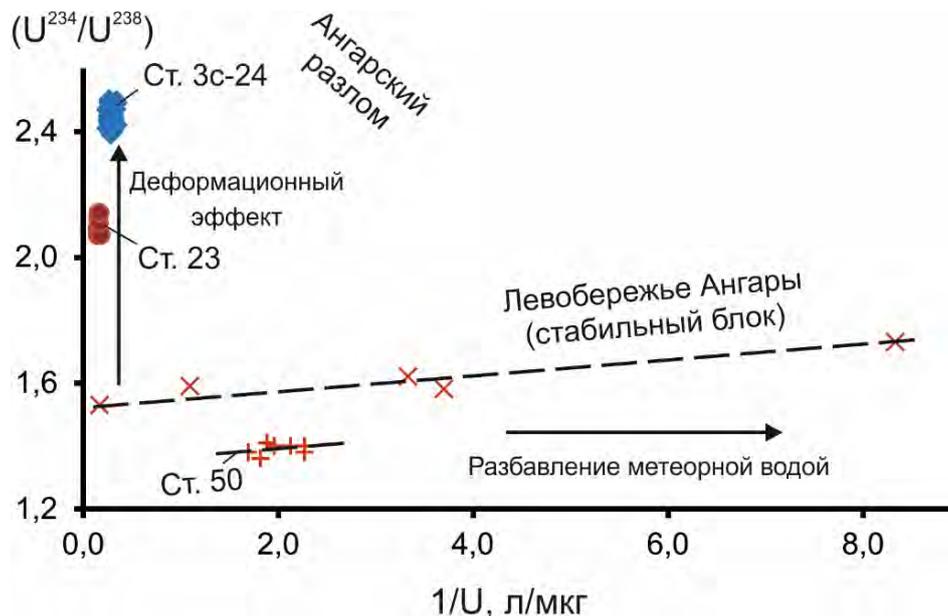


Рис. 2. Соотношения ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) –  $1/U$  в водах родников из Ангарского разлома и стабильного блока с юрскими отложениями на левобережье р. Ангара

Воды из отложений осадочного чехла рифей-венд-кембрийского возраста опробовались в районах пос. Худяково, Олха, Большой Луг и мыса Шаманка. Существенное повышение ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) в водах этих территорий служит признаком проявления химического эффекта растворения в подземных водах минеральных компонентов пород. В районе пос. Олха, Большой Луг и мыса Шаманка рифей-венд-кембрийские отложения расчленены на 50–150 м. Мониторинг Олхинской скважины минеральной воды “Иркутская” (глубина 350 м) (ст. 56) показал возрастание ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) от 11,82 до 14,95 в период с 20.06.2013 до 25.02.2015 ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) и снижение до 14,37 в пробе, отобранной 25.04.2015. Концентрации U последовательно снизились от 0,55 до 0,38 мг/л. Плавный ход изменений концентраций и изотопного состава U нарушался 22.03.2013 и 18.05.2014, возможно, из-за наложения деформационного эффекта на общий химический контроль вхождения урана в минеральные воды Олхинской скважины (Рис. 3).

Изотопный состав урана подземных вод из шовной зоны района пос. Култук был предметом специальных исследований для определения критериев среднесрочного прогноза сейсмических событий в Южно-Байкальской впадине. Сейсмопрогностический деформационный мониторинг ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) проводился в 2012–2014 гг. на Култукском полигоне западного побережья оз. Байкал. Выявлены отклики вариаций изотопного состава урана на сейсмические события в Южно-Байкальской впадине [Чебыкин и др., 2015].

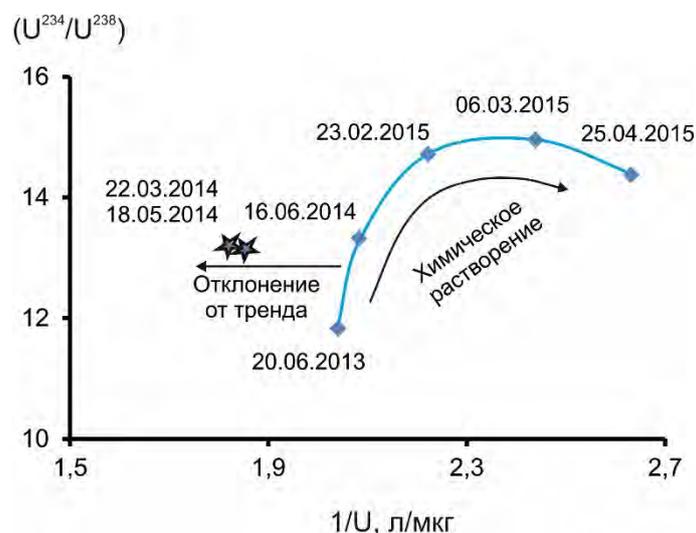


Рис. 3. Временные вариации ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) (а), концентраций U (б) и соотношения ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) –  $1/U$  (в) в минеральных водах из Олхинской скважины. Отклонение от тренда химического растворения во временном интервале 22.03.2014–18.05.2014 может быть связано с наложением деформационного эффекта.

Распределение точек станций наблюдений в координатах ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) –  $1/U$  интерпретируется в связи с проявлением деформационного эффекта Чалова–Чердынцева, усложненного разбавлением подземных вод из деформационной зоны водами метеорного происхождения. Состав U, близкий к циклическому равновесию, т.е. ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ )  $\approx 1$  с повышенным содержанием U  $\sim 3$  мкг/л ( $1/U = \sim 0,33$ ), характеризует зону окисления, не затронутую деформациями. Возрастание ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) отражало деформации. Разбавление выразилось в образовании двух протяженных трендов, слегка наклоненных относительно оси абсцисс (Рис. 4).

В результате деформационного воздействия на породы зоны окисления (ст. 45) образовался источник вод ст. 8 (Чертова Гора), занимающей относительно высокое положение в рельефе. На низких уровнях (ст. 29 в долине р. Медлянка и др. станциях) происходило разубоживание концентраций урана этого источника с образованием тренда I. Уровень разубоженных вод тренда I служил в качестве исходного для проявления наложенного деформационного эффекта с относительным возрастанием ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) в водах ст. 40, 9 и 66А. Только воды последней из трех станций опробования (родник остановочного пункта Партизанский) обнаружили разубоживание метеорными водами. Воды двух других станций, представляющих собой скважины глубиной 60–120 м, не сопровождалась разубоженными составами. Наконец, особо выделяется состав ст. 27 (скважина школы № 7) с максимальными значениями ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ), возможно, производными от значения отношения

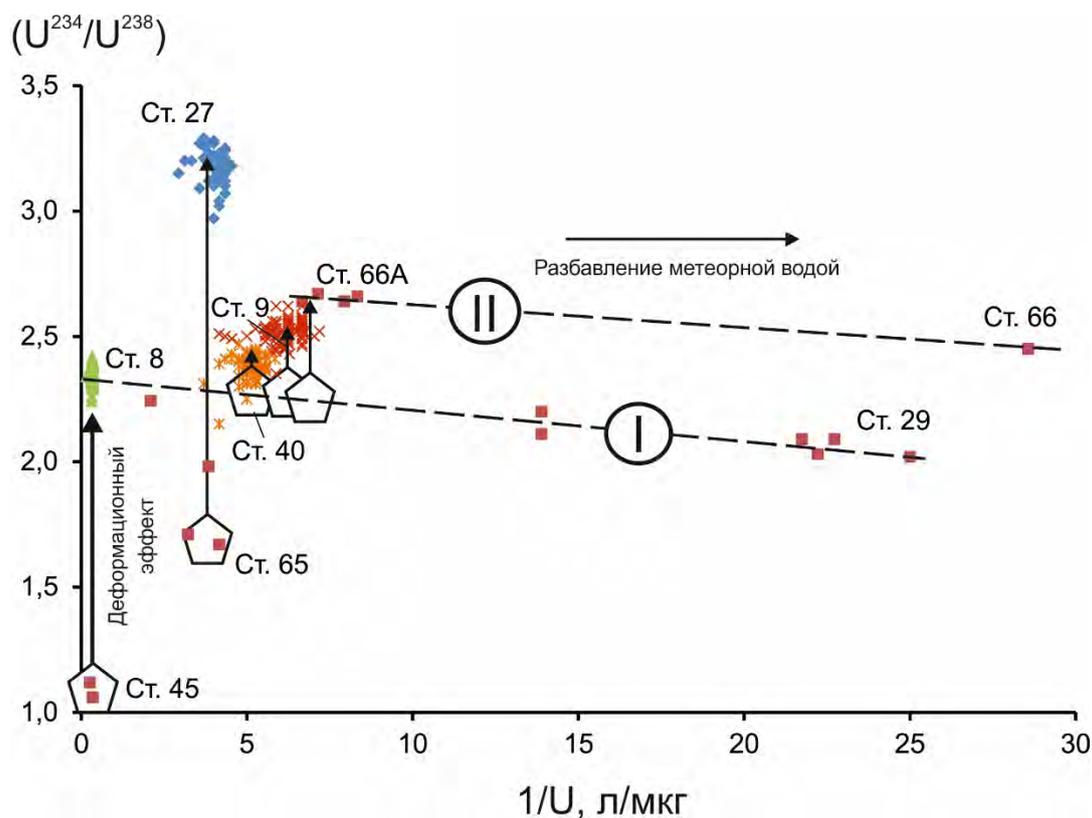


Рис. 4. Соотношения ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) –  $1/\text{U}$  в подземных водах из пород шовной зоны между фундаментом Сибирской платформы и Слюдянским субтеррейном

Вертикальными стрелками выделены 3 типа деформационного отклика ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) в водах из скважин: ст. 45 → ст. 8 – начальный (наиболее низкий) уровень деформаций зоны окисления, ст. 8 → ст. 40, 9 и 66А – превышение ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) относительно уровня деформаций ст. 8, ст. 65 → ст. 27 – наиболее значительное возрастание ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ), возможно, не связанное с начальным уровнем деформаций ст. 8. Тренд I обозначает разбавление вод начального (наиболее низкого) уровня деформаций зоны окисления (ст. 8), тренд II – разбавление родниковой воды остановочного пункта Партизанский (ст. 66А).

активностей урана ст. 65 (дренирующая штольня железнодорожного туннеля Партизанский). Подобно водам ст. 40 и 9, воды ст. 27 не имеют разбавленных составов.

### Заключение

Гидроизотопный профиль Иркутск–Байкал пересекает четвертичные отложения в зоне Ангарского разлома, юрские и рифей-венд-кембрийские отложения осадочного чехла Сибирской платформы, архейский фундамент, шовную зону между фундаментом Сибирской платформы и Слюдянским метаморфическим субтеррейном Хамардабанского террейна и Слюдянский субтеррейн. Отношения активностей  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  в подземных водах меняются в зависимости от вмещающих пород. Результаты, полученные для подземных вод из юрских отложений осадочного чехла, из архейских пород фундамента Сибирской платформы и из пород Слюдянского метаморфического субтеррейна, рассматриваются как показатель фонового взаимодействия вода–порода в стабильных блоках коры (диаграммы не показаны).

Для регистрации деформационной составляющей в гидроизотопном мониторинге на рассматриваемом профиле представляют интерес три объекта:

1. Возрастание концентраций U и ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) в родниковых водах станций Ангарского разлома, по отношению к подземным водам из сопредельных территорий юрских отложений, отражает повышенные деформации, связанные с его текущей активностью в районе Иркутска.

2. Отчетливые плавные длиннопериодные вариации концентраций U и ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) в минеральных водах из Олхинской скважины обусловлены эффектом химического растворения минеральных компонентов из кембрийских отложений усольской свиты. Деформационный эффект может регистрироваться в осложнениях временного вариационного тренда урановых параметров.

3. Возрастание ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) в подземных водах из шовной зоны между фундаментом Сибирской платформы и Слюдянским субтеррейном (на Култукском геодинамическом полигоне) характеризует деформационный эффект, а снижение концентраций U – разбавление подземных вод метеорными водами. Тренд смешения определяется резервуаром вод начального (сравнительно низкого) уровня деформаций зоны окисления. По повышенным значениям ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) в подземных водах из локальных резервуаров подземных трещинных вод регистрируются деформации, превышающие начальный уровень деформационного эффекта.

### **Список литературы**

Зверев В.Л., Долидзе Н.И., Спиридонов А.И. и др. Аномалия четных изотопов урана в подземных водах сейсмоактивных районах Грузии // Геохимия. – 1975. – № 11. – С. 1720–1724.

Чебыкин Е.П., Рассказов С.В., Воднева Е.Н., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В. Первые результаты мониторинга  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  в водах из активных разломов западного побережья Южного Байкала // Доклады академии наук. – 2015. Т. 460, № 4. – С. 464–467.

Finkel R.C. Uranium concentrations and  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  activity ratios in fault-associated groundwater as possible earthquake precursors // Geophysical Research Letters. – 1981. – V. 8, N 5. – P. 453–456.

Tokarev I., Zubkov A.A., Rumynin V.G., Polyakov V.A., Kuznetsov V.Yu., Maksimov F.E. Origin of high  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  ratio in post-permafrost aquifers // Uranium in the Environment: Mining impact and consequences. / B.J. Merkel, A. Hasche-Berger (eds.). Springer, 2006. P. 847–856.

УДК 550.34 + 550.371 + 550.834

**СЕЙСМИЧНОСТЬ, СЕЙСМОТЕКТОНИКА, РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ ОТ ОЧАГОВЫХ ЗОН И ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В КАРПАТСКОМ РЕГИОНЕ УКРАИНЫ)**

**Назаревич А.В.<sup>1</sup>, Назаревич Л.Е.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Карпатское отделение Института геофизики им. С.И.Субботина НАН Украины, Украина, 79060, г. Львов, ул. Научная, 3-б, e-mail: nazarevych.a@gmail.com*

<sup>2</sup>*Институт геофизики им. С.И.Субботина НАН Украины, отдел сейсмичности Карпатского региона, Украина, 79011, г. Львов, ул. Ярославенко, 27, e-mail: nazarevych.l@gmail.com*

Представлены методики и результаты изучения сейсмичности (за сотни лет по историческим данным и с 1899-1961 гг. инструментально) и сейсмотектоники Карпатского региона Украины. Это методики уточнения гипоцентрии местных землетрясений на основе расчетных годографов, построенных по скоростной модели литосферы региона по данным региональных профилей ГСЗ-КМПВ. Достигнутая точность локализации очагов землетрясений (порядка 1 км) дает возможность надежно проследить сейсмоактивные тектонические структуры по латерали и вглубь коры. На этой основе а также с привлечением анализа макросейсмических полей (в частности, методик Шебалина) проанализирована связь механизмов землетрясений и процессов в очагах с геомеханикой очаговых зон и физическими свойствами (в т.ч. трещиноватостью, флюидонасыщенностью, электропроводностью, температурным режимом и реологией) слоев коры. По данным мониторинговых геофизических наблюдений (деформографических, наклономерных, геоакустических, геотермических, геомагнитных, геоэлектрических) прослежены особенности распространения и проявления предвестниковых аномалий – пре-, ко- и постсейсмических возмущений от очаговых зон местных, региональных и мировых землетрясений (в частности, Восточной Сибири и Тихоокеанской окраины Евразии) в литосфере всего материка и Карпатского региона. Приведены результаты тектонофизического моделирования характерных процессов структуро- и разрывообразования – сдвигов, сбросов, горстов, грабенов, складок и надвигов.

Ключевые слова: сейсмичность, сейсмотектоника, геофизический мониторинг, аномалии-предвестники, прогноз землетрясений, тектонофизическое моделирование, Карпатский регион Украины.

**SEISMICITY, SEISMOTECTONICS, PROPAGATION OF DISTURBANCES FROM SOURCE ZONES AND EARTHQUAKES PROGNOSIS (on example of researches in the Carpathian region of Ukraine)**

**Nazarevych A.V.<sup>1</sup>, Nazarevych L.Ye.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Carpathian Branch of Subbotin name Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, UKRAINE, 79060, Lviv, Naukova st. 3-B, e-mail: nazarevych.a@gmail.com*

<sup>2</sup>*Department of seismicity of Carpathian region of Subbotin name Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 79012, Lviv, Jaroslavenko st., 27, e-mail: nazarevych.l@gmail.com*

**Methodologies and results of the study of seismicity (for hundreds of years by historical data and during 1899-1961 years instrumentally) and seismotectonics of Carpathian region of Ukraine are presented. This are methods of verifying the hypocenter of local earthquakes on the basis of the calculated travel times which was generated on a velocity model of the regions lithosphere according to the regional profiles DSZ-CRM. Reached accuracy of earthquakes foci localization (about 1 km) makes it possible to reliably trace the seismically active tectonic structures on lateral and into deep of crust. On this basis and also with the involvement of the analysis of macroseismic fields (in particular, methods of Shebalin) the relationship of earthquakes mechanisms and processes in the sources with geomechanics of source zones and physical properties of crust layers (including fracturing, fluid saturation, electrical conductivity, temperature and rheology) was analyzed. According to geophysical monitoring observations data (extenzometric, tiltmetric, geoacoustic, geothermal, geomagnetic, geoelectrical) peculiarities of propagation and visualization predictive anomalies i.e. pre-, co- and post-seismic disturbances of the focal areas of local, regional and global earthquakes (particularly in Eastern Siberia and Pacific margin of Eurasia) in the lithosphere of the whole continent and the Carpathian region was traced. The results of the tectonophysical modeling of typical processes of structure formation and faulting i.e. shears, downthrows, horsts, grabens, folds and nappes are given.**

Key words: seismicity, seismotectonics, geophysical monitoring, anomalies-precursors, earthquake prognosis, tectonophysical modeling, Carpathian region of Ukraine.

## **Введение**

Сейсмичность территорий генетически связана с их геодинамикой и строением литосферы. Исследование особенностей таких связей наряду с изучением общих характеристик сейсмичности и геодинамики для каждого сейсмоактивного региона входит в число актуальных задач геофизики. Эти задачи также связаны с проблемой прогноза землетрясений, исследования по которой вновь актуализировались после произошедшей в последние годы серии разрушительных мировых землетрясений. Краткому изложению результатов наших с коллегами более чем 30-летних исследований в этих направлениях, проводимых в Карпатском регионе Украины, и посвящена настоящая работа.

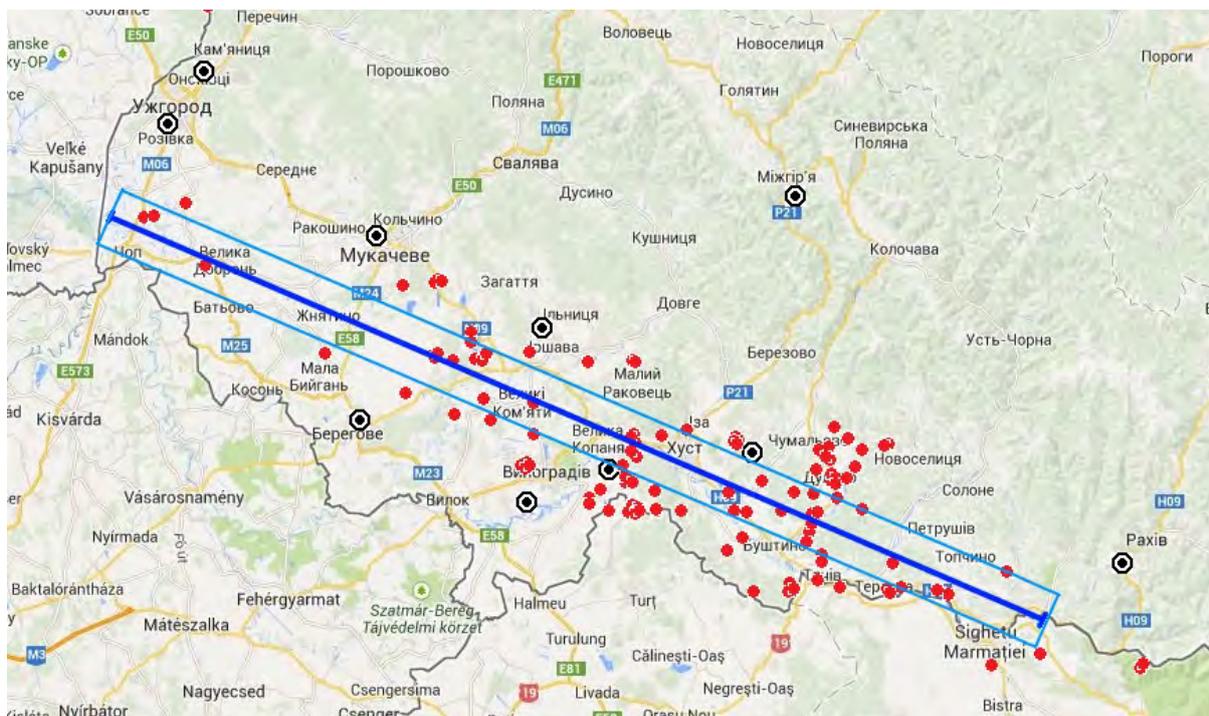
### **Мониторинг сейсмичности**

Основой изучения региональной сейсмичности является наблюдательная сейсмическая сеть. Такая сеть сейсмических станций начала развиваться в Карпатском регионе Украины с начала 20-го века (станция «Львов», 1899 г.) и в настоящее время состоит из более чем 20-ти станций и пунктов наблюдений. Сеть создана в Отделе сейсмичности Карпатского региона Института геофизики им. С.И.Субботина НАН Украины под руководством С.Т. Вербицкого и оснащена цифровыми сейсмическими станциями собственной разработки с передачей данных по Интернету в региональный центр (Львов).

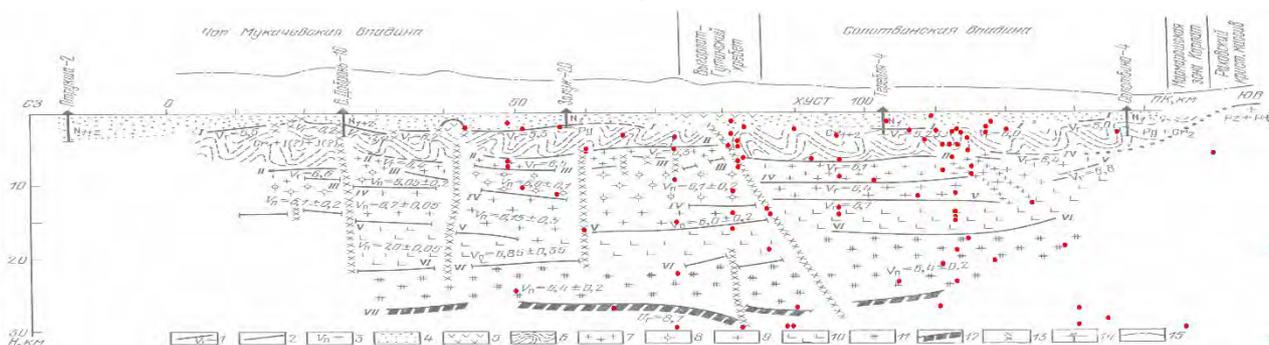
## Дешифровка активных сеймотектонических структур

Невзирая на достаточно густую сеть наблюдений (расстояние между ближними станциями порядка 25-35 км) актуальной для региона была проблема точной локализации очагов землетрясений по инструментальным данным. Это связано со сложным тектоническим (и, как следствие, скоростным) строением литосферы региона [2, 6-8], состоящей из трех крупных тектонических единиц – собственно Складчатых Карпат и передового Предкарпатского и тылового Закарпатского прогибов, имеющих разную толщину (25-27 км в Закарпатье, 35-55 км в Карпатах и 45-65 км в Предкарпатье) и разное скоростное строение коры (с наличием слоев пониженных скоростей в «гранитах» и «базальтах» в Закарпатье и коро-мантийной смеси под Карпатами), разбитой густой сетью диагональных (северо-запад – юго-восточного, карпатского простирания), ортогональных и меридиональных разломов. Для решения этой проблемы нами был разработан метод уточненной гипоцентрии местных землетрясений на основе расчетных годографов [3-5], построенных по скоростной модели литосферы региона по данным региональных профилей ГСЗ-КМПВ (в частности, регионального профиля РП-17 (см. ниже)), а также использованы (в качестве поправок) усредненные невязки Р- и S-волн для конкретных сеймостанций и сейсмогенных зон. Достигнутая точность локализации очагов землетрясений (порядка 1 км) дает возможность надежно проследить сейсмоактивные тектонические структуры по латерали и вглубину. Примером такого прослеживания может служить пространственный анализ сейсмичности в Закарпатском прогибе в зоне упомянутого регионального профиля РП-17 (Рис. 1). Цепочками землетрясений здесь хорошо прослеживаются (по латерали и вглубину) вертикальные разломы (как оказывается, сейсмически активные и в настоящее время), служившие в неогеновое время каналами подвода магм для Вигорлат-Гутинского вулканического хребта и других вулканических структур в регионе. Так, большая группа очагов в зоне пересечения профилем Оашьского разлома (контактной зоны между террейнами Алькапа и Тисия-Дакия в регионе) к западу и юго-западу от Хуста (Рис. 1, а) четко фиксирует активный сеймотектонический узел, образованный пересечением на глубинах залегания фундамента (2-7 км) двух разломов – вертикального (трассирующегося сейсмикой ГСЗ и очагами землетрясений в мантию – глубже 30 км), по которому в свое время поднималась магма, формировавшая этот сегмент вулканического хребта, и наклоненного (под углом примерно  $60^\circ$ ), по которому восточный край Алькапы пододвигается (частично послойно, благодаря сильной реологической расслоенности земной коры из-за высокого ( $100-130 \text{ мВт/м}^2$ ) теплового потока) под западный край Тисии-Дакии.

О такой современной геодинамике этого района говорят и данные геофизики (размещенных рядом пунктов деформографических и параметрических геоакустических



а)



б)

Рис. 1. Сейсмичность Закарпатского прогиба в зоне профиля РП-17 (а) (на картооснове Google) и локализация гипоцентров местных землетрясений на тектонических структурах в сечении профиля (б) (красные точки – очаги землетрясений)

наблюдений), геодезии (нивелирования, триангуляции, трилатерации, светодальномерных и современных GPS-измерений), и очень специфические механизмы местных землетрясений (горизонтальный послойный сдвиг в горизонтальной плоскости в азимуте порядка  $50^\circ$ ) [6, 7].

На 35 км восточнее на профиле имеется другой такой сейсмотектонический узел с аналогичным режимом, сформированный вертикальным разломом и известным Тереблянским надвигом (поддвигом) с углом падения порядка  $45^\circ$ , который в морфологии рельефа отражается разницей высот в 200-300 м протекающих в соседних долинах (на расстоянии 3-5 км) рек Теребля и Рика, что использовано гидроэнергетиками для создания известной Теребле-Рикской ГЭС.

## **Пространственные характеристики сейсмичности и физико-механическое состояние сейсмогенных структур (на примере Закарпатского прогиба)**

На приведенном выше профиле РП-17 можно частично проследить связь сейсмичности Закарпатья с физико-механическим состоянием сейсмогенных структур [6, 7], в частности, с локализацией реологически ослабленных подзон (слоев) пониженных скоростей в «гранитах» и «базальтах» коры субрегиона. Более четкую картину дает специальное исследование – очаги землетрясений здесь в основном локализуются по глубине в пределах фундамента и верхов «гранитов» (глубины 2-7 км) и верхов «базальтов» (10—16 км), немного также в неогеновых осадочных толщах (1-3 км), а в пределах ослабленных зон в «гранитах» (7-10 км) и «базальтах» (16-20 км) землетрясений очень мало. Также очень мало их (из-за высоких глубинных температур) и на больших (глубже 20 км) глубинах, в основном только в зонах глубинных разломов, в первую очередь, Закарпатского, разделяющего Закарпатский прогиб и Складчатые Карпаты, и Оашского меридионального и его продолжения под Складчатые Карпаты.

Еще один интересный результат – специфическая связь сейсмичности Карпат с имеющимися здесь зонами повышенной проводимости в земной коре, формирующими известную Карпатскую аномалию проводимости [2] (результаты последних, совместных с И. Логвиновым, В. Тарасовым и С. Ковачиковой исследований). По данным этих авторов, зоны повышенной проводимости локализуются преимущественно на глубинах 10-11 км и имеют своеобразную пространственную конфигурацию (Рис. 2. б). Сопоставление сейсмичности на глубинах  $10 \pm 2,5$  км с этими зонами проводимости показывает (Рис. 2. б), что эпицентры землетрясений окружают эти зоны со всех сторон (в том числе сверху и снизу), а в объеме самих зон землетрясения не происходят. Исходя из этого, а также из анализа физических условий на этих глубинах (расчетные температуры порядка 400-450 °С), мы считаем, что повышенная проводимость таких зон обусловлена их повышенной трещиноватостью и флюидонасыщенностью (поскольку температуры здесь не достигают необходимых для частичного плавления в присутствии воды 650 °С), а указанное соотношение с очагами землетрясений обусловлено тем, что в таких зонах тектонические напряжения перераспределяются в значительной мере за счет гидравлических эффектов, концентрируясь в краевых частях трещиноватых зон и обуславливая генерацию землетрясений именно здесь. Такие процессы физически аналогичны тем, которые происходят при известном и широко применяемом в нефтегазодобыче сланцевых углеводородов процессе фракинга (гидроразрыва пластов).

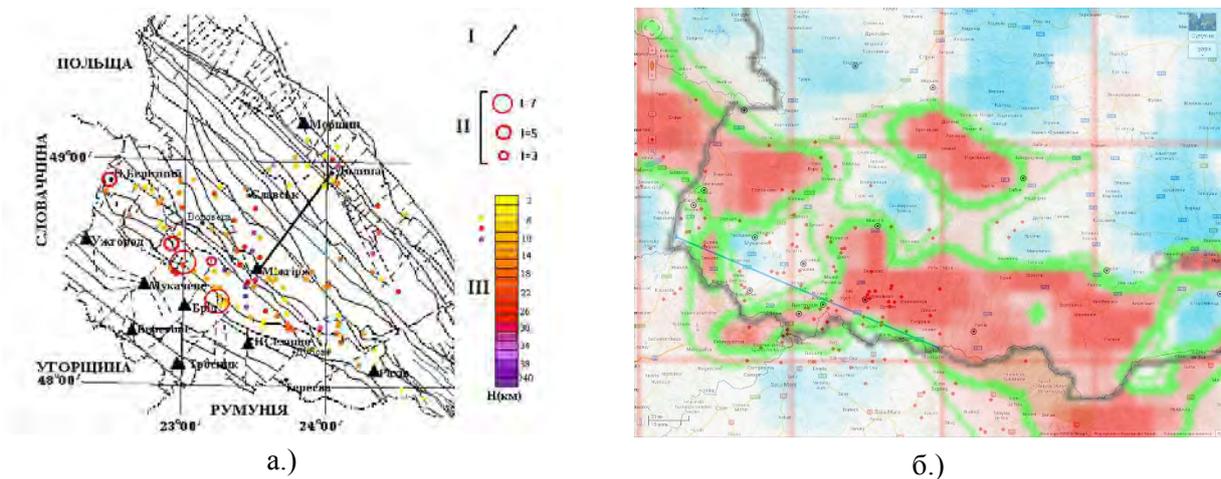


Рис. 2. Сейсмичность Складчатых Карпат (а) и землетрясения Карпатского региона на глубинах  $10 \pm 2,5$  км (б) и локализованные на этих (10-11 км) глубинах зоны повышенной проводимости в земной коре (данные И. Логвинова, В. Тарасова и С. Ковачиковой [4])

I – профиль Межгорье – Долина; II – эпицентры исторических землетрясений и их бальность; III – эпицентры инструментально зарегистрированных землетрясений и глубины их очагов

### Сейсмичность и техногенные процессы (на примере зон активной нефтегазодобычи в Предкарпатье)

В Предкарпатье присутствует спорадическая сейсмичность, связанная с общей тектоникой и геодинамикой региона – взаимодействии Карпатских структур и юго-западного края Восточноевропейской платформы. Наблюдаемая в последние десятилетия (1984-86 гг., район г. Долина, 1996-2011 гг., район г. Надворная) локальная сейсмическая активность специфически связана с нефтегазоносными структурами и зонами добычи углеводородов. Так, в сейсмически спокойном до того районе г. Надворная в процессе интенсификации нефтегазодобычи с 1996 г. начала наблюдаться возрастающая сейсмическая активность (землетрясения с  $M=1-2,4$ ), достигшая максимума в 2006 г. (Рис. 3. а). Причем локализация очагов наблюдается на глубинах  $2 \div 2,8$  км и  $4,7 \div 6,9$  км, в то время, как добыча углеводородов осуществляется с глубин от 2,3 до 4,4 км.

То есть, имеет место нечто подобное соотношению для землетрясений и зон проводимости для Закарпатья, и причины этого представляются также похожими – трещиноватость и флюидонасыщенность плюс изменения напряженно-деформированного состояния массивов пород из-за нефтегазодобычи. А построенные для определения ориентации разрывов (направлений вспаривания) и дальнейших сопоставлений с тектоникой азимутальные годографы для более сильных (с  $M=1,7-2,4$ ) из местных землетрясений показывают, что сейсмоактивные разрывы имеют карпатское (аз.  $135^\circ$  и  $304-313^\circ$ ), близмеридиональное (аз.  $10-12^\circ$ ) и близширотное (аз.  $90-98^\circ$  и  $277-280^\circ$ ) направления.

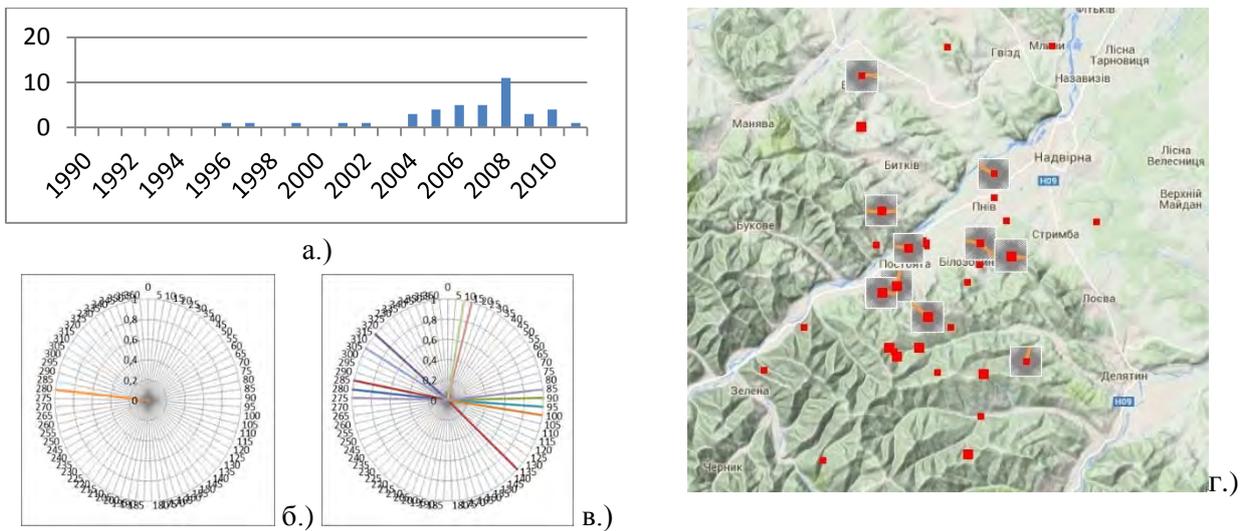


Рис. 3. Сейсмичность (годовое количество землетрясений) района г. Надвornoй за 1990-2011 гг. (а), направления вспаривания разрывов в одном (б) и ряде других очагов (в) и локализация эпицентров этих землетрясений на картооснове Google

красные прямоугольники – эпицентры землетрясений: малые – с  $2 \geq M \geq 1$ , большие – с  $M \geq 2$ . Для ряда землетрясений оранжевыми линиями показаны направления вспаривания разрывов).

### Сейсмопрогностические исследования (методы и результаты)

Сейсмопрогностические геофизические исследования проводятся в Карпатском регионе Украины уже на протяжении более 30 лет [2, 10]. Для этих исследований применяются деформографические, наклономерные, геоакустические (параметрические зондирующие и акустоэмиссионные), геотермические (в т.ч. глубинные скважинные), геомагнитные, различные геоэлектрические методы. По данным этих наблюдений прослежены особенности распространения и проявления предвестниковых аномалий (пре-, ко- и постсейсмических возмущений) от очаговых зон, в первую очередь, местных, а в последнее время (по деформографическим и наклономерным данным) также региональных и мировых землетрясений (в частности, Восточной Сибири и Тихоокеанской окраины Евразии) в литосфере всего материка и Карпатского региона (см. Рис. 4).

Установлено, что в первом приближении расстояние распространения деформационных (в т.ч. наклоны) предвестников от очаговых зон (радиус регистрации с амплитудами, превышающими величины приливных вариаций) в зависимости от магнитуды землетрясения можно представить такой усредненной корреляционной зависимостью:  $L^* = k \times 10^{(M+1)/2}$  ( $L^* = k \times 10^{(0,55K-2,22)/2}$ ), где  $k$  в общем случае равно 1.

Прослеживается сильное влияние на величину деформационных аномалий особенностей строения и напряженного состояния коры на пути распространения упругих возмущений и в очаговой зоне – коэффициент  $k$  оценочно может быть даже 0,2-0,3 для раздробленной среды и условий растяжения (такие оценки получены для некоторых аномалий

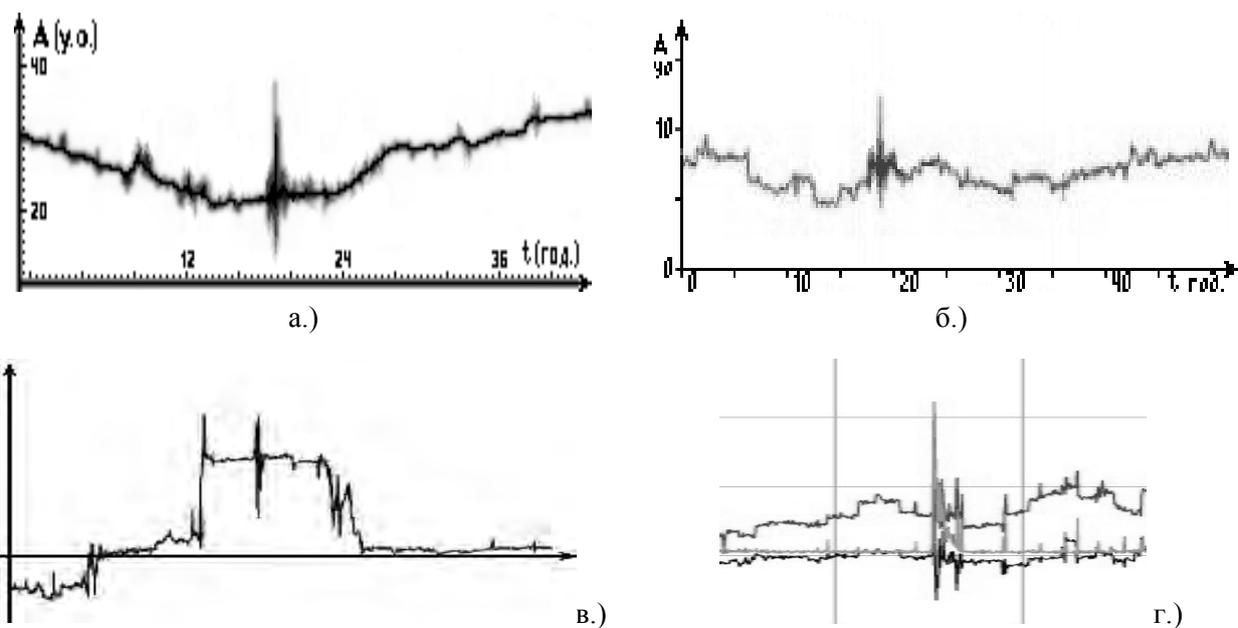


Рис. 4. Пре-, кои постсейсмические деформационные волны от некоторых сильных мировых землетрясений по данным кварцевого деформографа (а-в) и наклономера-маятника (д) РГС «Берегово»

а.) – Аляска, 5.01.2013 г.,  $M=7,8$ ; б) – Чили, 1.04.2014 г.,  $M=8,1$ ; в.) – в Охотском море (возле Сахалина) 14.08.2012 г.,  $M=7,7$ ; г.) – Непал, 25.04.2015 (маятник, 2 компоненты).

(или их отсутствия) для местных закарпатских землетрясений) или порядка 0,4-0,6 (для ряда землетрясений Турции, возмущения от которых проходят через структуры Восточных Карпат, в частности, в районе зоны Вранча и в прилегающих секторах) и до 1,5-2 для ненарушенной среды и условий сжатия (такие оценки получены для некоторых других аномалий местных закарпатских землетрясений и для ряда землетрясений Камчатки, Курил, Сахалина (см. Рис. 4) деформации от которых идут через достаточно консолидированные и находящиеся в условиях сжатия тектонические структуры Евразии, в отличие от них аномалии от землетрясений Индонезии, Соломоновых о-вов и т.п. затухают сильнее).

#### **Физическое моделирование тектонических процессов структуро- и разрывообразования**

Одним из важных для практики направлений исследований является тектонофизическое моделирование процессов структуро- и разрывообразования. Проведенное нашим коллегой А.Н. Бокуном такое моделирование для разных процессов и разных геодинамических обстановок, в том числе для зон горизонтального сдвига [1] (Рис. 5, а-в) и сбросовых зон (Рис. 5, г, д) дает возможность проследить пространственно-временные закономерности развития таких процессов и надежнее интерпретировать данные различных, в том числе сесмотектонических и описанных выше сейсмопрогностических полевых исследований. В частности, результаты моделирования сбросовых зон вместе с данными других

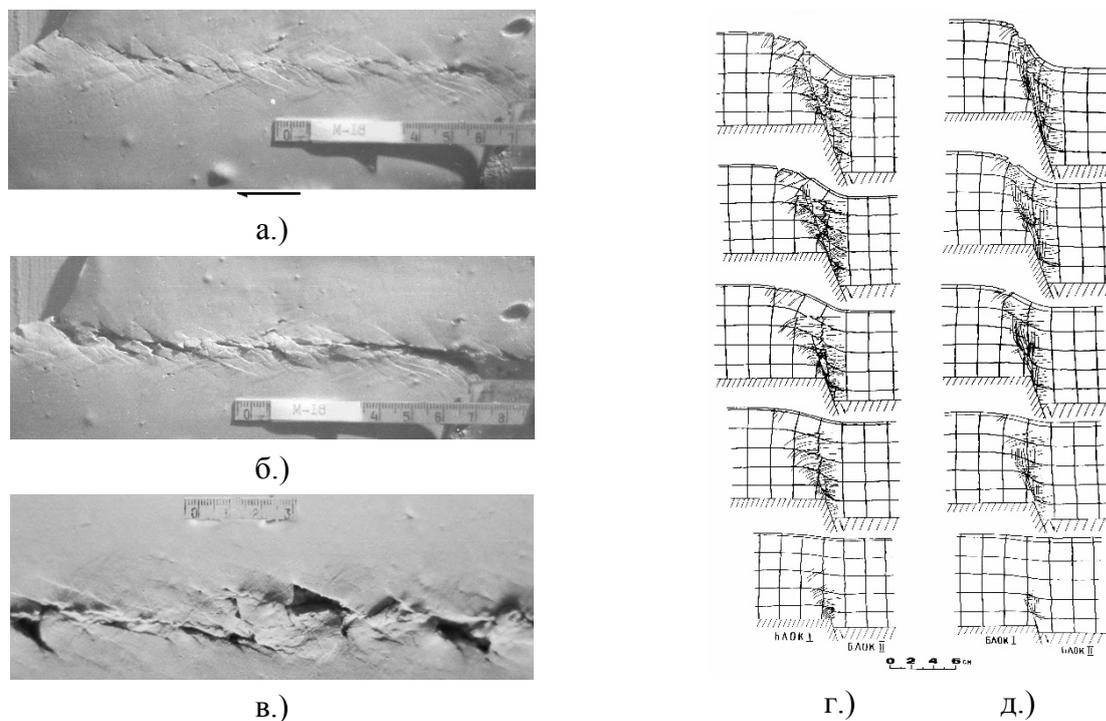


Рис. 5. Развитие зон горизонтального (а-в) и вертикального (г, д) сдвига (сбросы) в физических моделях из специальных глинистых паст с разными механическими свойствами (а-в) и разной скоростью смещений (г, д) (Бокун А.Н.).

геофизических исследований раскрывают физическую основу геоэлектроэмиссионного метода (по другому – метода естественного импульсного электромагнитного поля Земли).

### Выводы

Данные представленных выше исследований вносят существенный вклад в исследование особенностей геодинамики и сеймотектонического процесса в Карпатском регионе Украины и могут быть использованы (методики – для исследований, данные – для сравнительного анализа) для подобных исследований в других сейсмоактивных регионах.

В частности, из анализа данных о распространении деформационных аномалий – предвестников землетрясений следует, что при сеймопрогностических исследованиях необходимо учитывать ход сеймотектонических процессов за значительно больших расстояниях от пунктов наблюдений, чем это считалось ранее.

### Список литературы

1. Бокун А.Н., Назаревич А.В. Структура и динамика зон горизонтального сдвига (по результатам физического моделирования и полевых исследований) // Геодинамика. – 2004. – 1 (4). – С. 53-62 (на укр. языке).
2. Вербицкий Т.З., Назаревич А.В. Деформографические и геоакустические исследования в Закарпатье // Исследования современной геодинамики Украинских Карпат / Под ред. В.И.Старостенко. – Киев: Наук. думка, 2005. – С. 113-131 (на укр. языке).
3. Назаревич А.В., Назаревич Л.Е. Расчетные годографы сейсмических волн в гипоцентрии карпатских

землетрясений // Вестник КНУ им. Т. Шевченко. Геология. – 2003. – № 26-27. – С. 98-103 (на укр. языке).

4. Назаревич Л.Е., Назаревич А.В. Методики уточнения параметров гипоцентров Карпатских землетрясений // Геодинамика. – 2004. – 1 (4). – С. 53-62 (на укр. языке).

5. Назаревич Л.Е., Назаревич А.В. Уточнение параметров карпатских землетрясений с учетом глубинного строения литосферы региона и усредненных кинематических невязок сейсмических волн // Вестник КНУ им. Т. Шевченко. Геология. – 2004. – № 29-30. – С. 83-88 (на укр. языке).

6. Назаревич Л.Е., Назаревич А.В., Стародуб Г.Р., Назаревич Р.А. О многоярусности сеймотектонического процесса в Украинском Закарпатье и его связи со структурой коры региона и свойствами ее вещества // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы Второй молодежной тектонофизической школы-семинара. – М.: ИФЗ. – 2011. – С. 179-186.

7. Назаревич Л.Е., Стародуб Г.Р., Назаревич Р.А. Некоторые вопросы взаимосвязи сейсмичности, тектоники и геодинамики Украинского Закарпатья // Проблемы сейсмологии в Узбекистане. – Ташкент. – 2010. – № 7, Т. 1. – С. 176-180.

8. Чекунов А.В., Ливанова Л.П., Гейко В.С. Глубинное строение и некоторые особенности тектоники Закарпатского прогиба // Сов. геология. – 1969. – № 10. – С. 57-68.

9. Kalenda P., Neumann L. et al. Tilts, global tectonics and earthquakes prediction. London: SWB, 2012. 247 p.

10. Nazarevych A., Nazarevych L., Nasonkin V., Boborykina O. Extensometric researches in Ukraine: methods, instruments, results // Геофиз. журн. – 2010. – 32, № 4. – С. 121-123.

**РАЗЛОМООБРАЗОВАНИЕ В ЗЕМНОЙ КОРЕ УЛААНБААТАРСКОГО  
ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА (МОНГОЛИЯ): РЕЗУЛЬТАТЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ РАДОНОВОЙ И СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ**

**<sup>1</sup>Семинский К.Ж., <sup>2</sup>Дэмбэрэл С., <sup>1</sup>Бобров А.А., <sup>2</sup>Мунгунсурен Д.**

*<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, e-mail:  
seminsky@crust.irk.ru*

*<sup>2</sup>Исследовательский Центр по Астрономии и Геофизике МАН, Монголия, Улаанбаатар,  
Баянзүрх дүүрэг, Маахуур толгой, 5-р хороо, ШУА-ийн 7-р байр, e-mail: emberel@rcag.ac.mn*

Проанализированы сейсмическая и эманационная активность разломных зон Улаанбаатарского геодинамического полигона, организованного с целью проведения в густонаселенном районе Монголии комплексных исследований опасных геологических процессов. Установлено, что деструкция коры на современном этапе тектогенеза осуществляется в поле сдвига с северо-западной ориентацией оси растяжения и северо-восточной – оси сжатия. При этом развивается сеть из 4 систем разломных зон, активных в сейсмическом и эманационном отношениях. Крупные правые и левые сдвиги меридиональной и широтной ориентировок играют ключевую роль в процессе деструкции, не подчиняясь сети более древних разломов. Северо-западные и северо-восточные зоны, развиваясь в условиях сжатия и растяжения, напротив, наследуют дизъюнктивы новейшего возраста и при сочленении разломов ортогональной сети располагаются у вершин двугранных углов. Установление стиля современного разломообразования имеет принципиальное значение для оценки сейсмической опасности столицы Монголии, где проживает более одной третьей части населения страны.

Ключевые слова: разломная зона, поле напряжений, землетрясение, радон

**FAULTING IN THE EARTH CRUST OF THE ULAANBAATAR GEODYNAMIC TEST  
SITE (MONGOLIA): RESULTS OF RESEARCH OF RADONIC AND SEISMIC ACTIVITY**

**<sup>1</sup>Konstantin Zh. Seminsky, <sup>2</sup>Sodnomsambuu Demberel, <sup>1</sup>Alexander A. Bobrov, <sup>2</sup>Dashdondog  
Mungunsuren**

*<sup>1</sup>Institute of the Earth Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia, Irkutsk,  
128 Lermontova Str., e-mail: seminsky@crust.irk.ru*

*<sup>2</sup>Research Center for Astronomy and Geophysics MAN, Mongolia, Ulaanbaatar, Bayanzurh duureg,  
Maahuur tolgoi, 5-r horoo, Shua-iyin 7-r bair, e-mail: demberel@rcag.ac.mn*

There are analysed seismic and radonic activity of the fault zones within the Ulaanbaatar geodynamic test site organized for carrying out of complex researches of dangerous geological processes in the densely populated region of Mongolia. It is established that destruction of crust at the present stage of a tectogenesis is carried out in

the stress field with northwest orientation of an axis of extension and northeast – compression axes. Thus the network of 4 systems of fault zones, active in the seismic and emanation relations develops. Large right and left strike-slip faults of sub-longitude and sub-latitude orientations play a key role in the destruction, without submitting to a network of more ancient faults. Northwest and northeast zones, developing in the compression and extension conditions, on the contrary, inherit disjunctives of the Neogene age and at a joint of faults of an orthogonal network settle down at tops of dihedral angles. Establishment of style of a recent faulting has basic value for an assessment of seismic danger of the Mongolian capital where more then one third part of the country population lives.

Keywords: fault zone, stress field, earthquake, radon

## Введение

Улаанбаатарский геодинамический полигон в территориальном отношении включает ближайшие окрестности столицы Монголии, где проживает более третьей части населения страны (Рис. 1). Причиной его создания послужила необходимость проведения в густонаселенном районе комплексных исследований современной геодинамической активности, опасным проявлением которой является увеличение числа слабых землетрясений ( $M=0,5-4,5$ ) и их приуроченность к линейно вытянутым (очевидно, разломным) зонам [10]. Кроме анализа сейсмичности, специалистами из разных стран мира в пределах полигона начаты и в течение нескольких последних лет проводятся геодезические, палеосейсмологические, эманационные, структурно-геологические, инженерно-геологические и другие виды исследований, направленных на выявление характера современной активности и оценку степени опасности для урбанизированного региона со стороны разнотипных геологических процессов и явлений.

Исследования тектонических нарушений, проведенные предшественниками, были в основном сконцентрированы на изучении крупных разломных зон Эмээлт и Хустай (Рис. 1), к которым в окрестностях Улаанбаатара приурочены явно выраженные скопления эпицентров землетрясений, произошедших в период 2000-2014 гг. У главных разломных сместителей были выявлены дислокации, свидетельствующие о древних землетрясениях с магнитудой 7,0-7,4 [1-2, 5, 7-8], что, учитывая их повторяемость во времени, может представлять существенную опасность для города. Активность разломов северо-восточного простирания связывается со сжатием земной коры в широтном [2] (до северо-запада–юго-восточного [5]) направлении. Широкий спектр ориентации осей напряжений регионального поля объясняется сложным характером палеосейсмогенных деформаций вблизи крупных разломов. Например, в зоне Хустай выявлены правосдвиговые [8], сбросовые [1] и надвиговые [5] структуры, что может отражать разновозрастные проявления его активности или специфику подвижек на отдельных сегментах в одном поле напряжений.

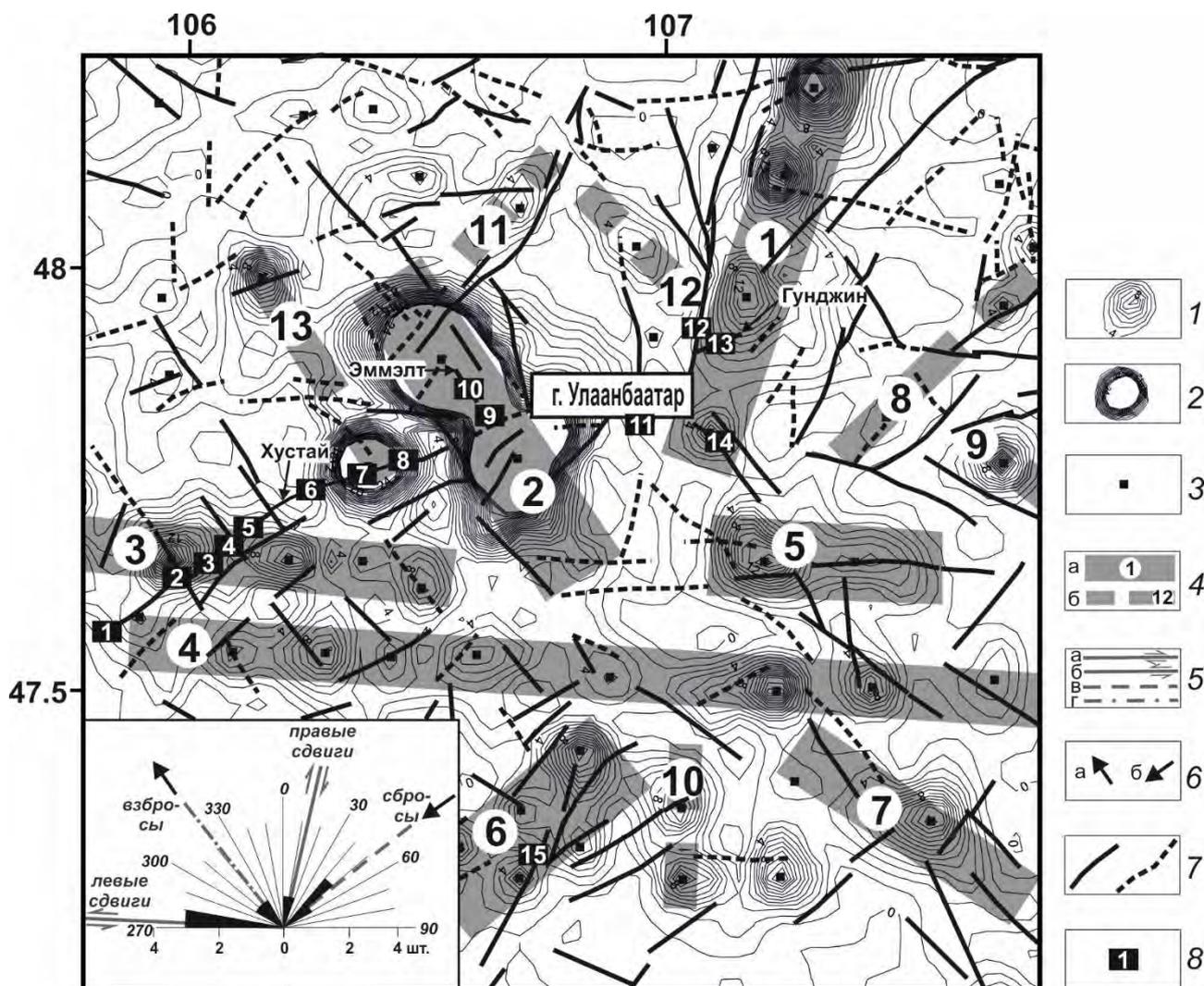


Рис.1. Схема распределения плотности эпицентров землетрясений с  $M=0,5-4,5$  (в изолиниях), которая послужила основой для выделения разломных зон, активных на современном этапе тектогенеза в пределах Улаанбаатарского геодинамического полигона (Монголия). На врезке – роза-диаграмма простираний сейсмоактивных разломных зон, а также кинематика их систем в сдвиговом поле напряжений 1-го порядка.

1 – изолинии плотности эпицентров землетрясений; 2 – максимумы, в пределах которых плотность эпицентров на единицу площади ( $25 \text{ км}^2$ ) больше 25; 3 – центр максимума; 4 – разломные зоны (и их порядковые номера), достоверно (а) и менее достоверно (б) выделяющиеся в поле эпицентров землетрясений; 5 – системы зон, развивающиеся в обстановках правого сдвига (а), левого сдвига (б), растяжения (в) и сжатия (г); 6 – ориентация субгоризонтальных осей главных нормальных напряжений растяжения (а) и сжатия (б) для регионального поля напряжений; 7 – новейшие разломы, выявленные на базе линейного анализа трехмерной модели рельефа [9] (пунктир – предполагаемое положение); 8 – местоположение и номера участков, в пределах которых была проведена профильная эманационная съемка для оценки радоновой активности разлома, отчетливо выраженного в рельефе.

В этом плане сделанный в данной работе акцент на анализе сейсмологических и эманационных измерений позволяет ограничить временной интервал разрывообразования его современным этапом. Кроме того, предполагается перейти от изучения отдельных разрывов к выделению и анализу разломных систем. Таким образом, цель данной статьи – установить

характер современной деструкции земной коры на базе исследований сейсмической и эманационной активности разломов, проведенных для полигона группой российско-монгольских специалистов.

### **Материал и методы исследований**

Фактической основой для решения поставленных задач послужили сейсмологические и эманационные материалы. Первая группа данных представляла информацию Исследовательского центра астрономии и геофизики МАН о сейсмических событиях с  $M=0,5-4,5$ , произошедших в пределах рассматриваемой территории в период 2000-2014 гг. Распределение плотности этих землетрясений позволило по сгущению изолиний и цепочкам максимумов установить положение на Улаанбаатарском полигоне зон современной сейсмической активности (Рис. 1). Вторая группа данных объединяла измерения объемной активности почвенного радона ( $Q$ ), полученные в пределах профилей, пересекающих на изучаемой территории разломы, отчетливо выраженные в рельефе уступами. Для проведения эманационной съемки использовался комплект оборудования «КАМЕРА-01», чувствительность которого составляет  $0.27 \pm 0.03 \text{ Бк}^{-1}\text{с}^{-1}$ , а пределы допускаемой относительной погрешности не превышают  $\pm 30\%$ . Разломы были изучены на 15 участках (Рис. 1), для которых в целом получены сотни оценок параметра  $Q$ . Материалы эманационной съемки позволили для каждого пересечения установить интенсивность ( $Q_{max}$ ) и контрастность ( $K_Q$ ) аномалии радона. Вторым параметр, согласно ранее проведенным исследованиям [4, 9], дает возможность установить принадлежность изучаемого дизъюнктива к группе разломов с низкой ( $K_Q \leq 2$ ), средней ( $3 \geq K_Q > 2$ ), повышенной ( $5 \geq K_Q > 3$ ), высокой ( $10 \geq K_Q > 5$ ) или сверхвысокой ( $K_Q > 10$ ) радоновой активностью, что определяется их современной геодинамической активностью.

### **Результаты исследований и их обсуждение**

В пределах Улаанбаатарского полигона располагается 13 зон повышенной плотности землетрясений, семь из которых выделяется однозначно по цепочечному расположению максимумов и/или вытянутости изолиний плотности. Эти сейсмоактивные структуры, показанные на Рис. 1 серым цветом, образуют 4 системы: субширотную (3, 4, 5), северо-западную (2, 7, 9, 12, 13), субмеридиональную (1, 10) и северо-восточную (6, 8, 11). Выделенные направления в разной степени наследуют сеть новейших разломов, показанных на рисунке 1 черными линиями. Это указывает на разломную природу зон современной сейсмической активности. В то же время, детальный анализ унаследованности выделенных зон не позволяет каждой из них поставить в соответствие разлом новейшего возраста. Так, структуры 3, 4 и 10 занимают секущее положение к рассматриваемым разрывным сетям, а для

зон 1, 9, 11 и 12 соответствующие по ориентировке новейшие разломы находятся рядом с их границами.

Вместе с тем, объективность выделения подобных зон подтверждается эманационными данными: радоновая активность разломов, изученных в пределах наиболее важных для дальнейшего анализа зон 1 и 3 (Рис. 1), достигает сверхвысокой степени (на участках № 3, 5 и 14 –  $K_Q > 10$ ). Кроме того, показатель радоновой активности  $K_Q$  для детально изученного разлома Хустай (8 эманационных профилей [4]) не превышает 4,1 за границами центральной области с повышенной плотностью эпицентров землетрясений (Рис. 2). Следовательно, этот крупный дизъюнктив в наиболее молодом поле напряжений полноценно не задействован: в последнее десятилетие динамично развиваются лишь те его фрагменты, которые располагаются в местах пересечения со структурами современной активности, например, субширотной зоной 3. Эта и субпараллельная ей, наиболее протяженная зона 4 развиваются при отсутствии продольных новейших разрывов за счет подвижек по разломам различных направлений, попавших в границы описываемых зон, что отчетливо видно по положению максимумов плотности эпицентров землетрясений (Рис. 1).

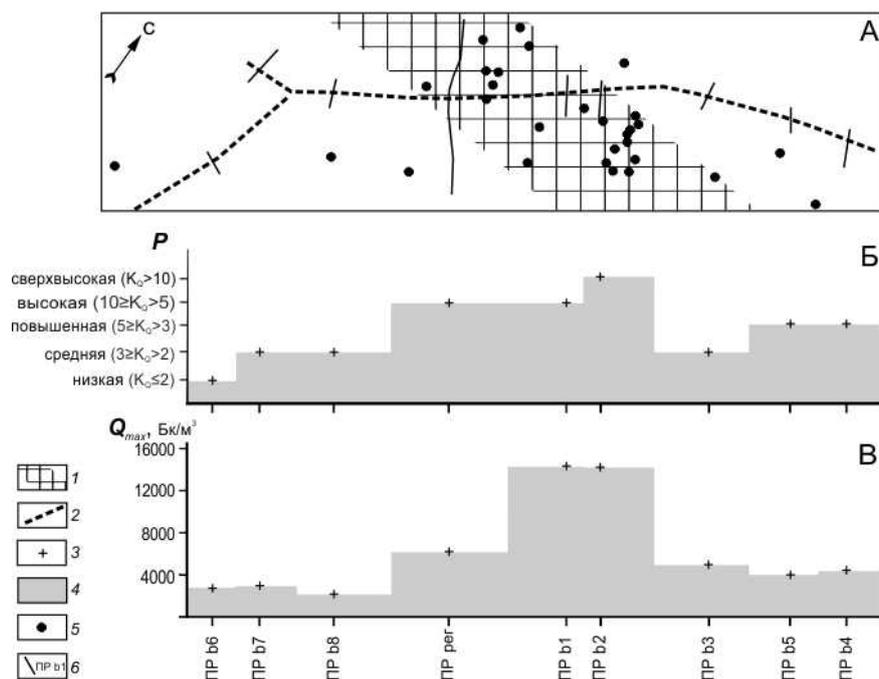


Рис. 2. Изменение сейсмической и радоновой активности вдоль сместителя разлома Хустай

А. Положение эпицентров землетрясений, произошедших в период эманационных измерений в полосе шириной 20 км, протягивающейся вдоль разлома Хустай. Б-В. Изменение вдоль простирания Хустайского разлома параметров радоновой активности, полученных при обработке данных профильной эманационной съемки: Б – вариации степени радоновой активности (P); В – вариации интенсивности эманационной аномалии. 1 – фрагмент субширотной сейсмоактивной зоны № 3 (см. Рис. 1); 2 – сместитель Хустайского разлома; 3 – точка графика, для которой получено значение параметра (на схеме местности соответствует точке пересечения профиля и сместителя разлома); 4 – сегментированный график, при построении которого значение параметра перенесено с точки измерения на половину расстояния до смежной точки; 5 – положение эпицентра землетрясения, произошедшего на площади исследования в 2013-2014 гг.; 6 – положение (и индексация) профилей эманационной съемки, для которых определены характеристики радоновой аномалии, представленные на графиках Б-В.

Таким образом, структура, выявленная по распределению сейсмичности на Улаанбаатарском полигоне, имеет дизъюнктивную природу и частично наследует сеть новейших разломов. При этом напряженное состояние является достаточно интенсивным, поскольку при отсутствии в земной коре благоприятно ориентированных разрывов оно реализуется путем развития новых крупных дизъюнктивных зон. Это позволяет, используя ориентировки их систем, сделать предположение о типе поля напряжений, в котором формируется разломная структура полигона на современном этапе тектогенеза.

Пространственные взаимоотношения зон современной активности в пределах полигона (угловые соотношения систем, расположение на местности наиболее крупных представителей и др.) свидетельствуют о том, что разломообразование должно осуществляться в поле сдвига с ориентировкой оси сжатия в направлении ЮЗ-СВ, а оси растяжения – ЮВ-СЗ (Рис. 1, врезка). Действительно, ключевую роль в формировании сети дизъюнктивных структур играют зоны субширотной и субмеридиональной ориентировок, наиболее крупные представители которых (1 и 4) лучше других выделяются цепочками максимумов в эпицентральной поле и выходят за границы полигона (Рис. 1). Это системы сопряженных сдвигов, т.к. вследствие развития в плоскостях действия скальвающих напряжений они практически не наследуют сеть уже существующих разломов. Субширотные зоны являются левыми, а субмеридиональные – правыми сдвигами, поскольку ось сжатия должна занимать биссекторное положение в остром ( $85^\circ$ ), а ось растяжения – в тупом ( $95^\circ$ ) углах между сопряженными системами (см. розу-диаграмму на рисунке 1).

Северо-западные и северо-восточные системы в рассматриваемом поле напряжений представлены непротяженными взбросами и сбросами, которые формируются, соответственно, в условиях сжатия и растяжения, наследуя уже существующие разломные сместители (Рис. 1). Особенно ярко это проявляется на северо-западе полигона в биссекторной области между зонами 1 и 3, где землетрясения в последние годы происходят наиболее часто вследствие активизации древнего разлома Эмээлт (зона 2). Высокая ( $K_Q=5,6$ ), но непропорционально малая по сравнению с сейсмичностью радоновая активность этого дизъюнктива по отношению к установленной для сдвиговых зон 1 ( $K_Q=14,3$ ) и 3 ( $K_Q=17,3$ ), является косвенным подтверждением ее формирования в доминирующей обстановке сжатия, затрудняющей выход газа к поверхности. В то же время разлом Эмээлт, занимая в совокупности из пяти северо-западных зон положение, наиболее близкое к меридиану, должен развиваться в условиях небольшой транспрессии и, таким образом, в дополнение к вертикальной иметь горизонтальную (правостороннюю) компоненту смещений.

Кинематика, охарактеризованная выше для четырех систем дизъюнктивных зон (Рис. 1, врезка), подтверждается серией дополнительных признаков, локальных по уровню

проявления. Это стресс-тензоры, восстановленные Д. Ганзоригом и А. Баттсентсегом для Улаанбаатарского полигона по характеристикам слабых землетрясений (устное сообщение на межд. конференции «Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии», г. Улаанбаатар, 30 сент. – 3 окт. 2014 г.). При всей дискуссионности подобных определений, они в большинстве случаев подтверждают наличие правосторонних подвижек в субмеридиональной зоне 1 и левосдвиговых – в субширотных зонах 3 и 4. Реконструкции для зоны разлома Эмээлт свидетельствуют о поперечной к нему ориентировке сжатия, однако полученные за период наблюдений решения, по-видимому, принадлежат к полям напряжений 2-го порядка, т.к. свидетельствуют о сдвигах по плоскостям, ориентированным косо по отношению к общему протиранию зоны 2.

### **Заключение**

Анализ отчетливо согласующихся между собой сейсмологических и эманационных данных свидетельствует о том, что разломообразование в земной коре Улаанбаатарского геодинамического полигона в настоящее время происходит в региональном поле напряжений, которое является отдаленным результатом Индо-Азиатской коллизии и, согласно [3; и др.], имеет место в некоторых смежных юго-западных регионах. Стиль активного разрывообразования на изученной территории определяется обстановкой сдвига с ориентацией оси сжатия в направлении ЮЗ-СВ, а оси растяжения – ЮВ-СЗ. В этом поле напряжений получает развитие сеть из четырех направлений разломных зон, причем наиболее крупные представители субширотной и субмеридиональной систем являются лево- и правосторонними сдвигами. Как правило, они пересекают древние тектонические нарушения, вызывая их фрагментарную активизацию, как это, например, характерно для крупного разлома Хустай на современном этапе тектогенеза. Разломные зоны северо-западной и северо-восточной систем, напротив, наследуют сеть разломов новейшего возраста и интенсивно развиваются в обстановках сжатия или растяжения, создающихся в областях сочленения сдвигов у вершин двугранных углов. Такова активизация в условиях сжатия (возможно, со сдвигом) древнего разлома Эмээлт, который в настоящее время контролирует самый интенсивный на полигоне рой слабых землетрясений.

Следует отметить, что применение в дальнейшем дополнительных методов анализа существующих данных, а также накопление новой информации о ходе сейсмического процесса может скорректировать предложенную модель разломообразования. Однако на сегодняшний день она достаточно полно объясняет комплекс проанализированных в статье сейсмологических и эманационных данных, которые были получены в последнее десятилетие на Улаанбаатарском полигоне.

Авторы благодарны сотрудникам лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН Ю.П. Бурзуновой, А.А. Тарасовой, А.К. Семинскому и сотрудникам ИЦАГ МАН М. Оюун-Эрдэнэ и М. Билгууну за помощь в сборе и обработке первичной информации.

### Список литературы

1. Дэмбэрэл С., Имаев В.С., Рогожин Е.А., Смекалин О.П., Улзийбат М., Чипизубов А.В. Спектры ускорений колебаний, возбуждаемых землетрясениями юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны // *Вопр. инж. сейсмологии.* – 2013. – Т. 40. – № 1. – С. 19-32.
2. Имаев В.С., Смекалин О.П., Стром А.Л., Чипизубов А.В., Сясько А.А. Оценка сейсмической опасности г. Улан-Батор (Монгольская Народная Республика) по результатам сейсмогеологических исследований // *Геология и геофизика.* – 2012. – № 9. – С. 1182-1193.
3. Саньков В.А., Парфеевец А.В., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В. Позднекайнозойская геодинамика и механическая сопряженность деформаций земной коры и верхней мантии Монголо-Сибирской подвижной области // *Геотектоника.* – 2011. – № 5. – С. 52–70.
4. Семинский К.Ж., Бобров А.А., Дэмбэрэл С., Бурзунова Ю.П., Мунгунсурен Д., Оюун-Эрдэнэ М., Семинский А.К., Билгуун М., Тарасова А.А. Зона Хустайского разлома (Центральная Монголия): результаты эманационной съемки // *Изв. Сиб. отделения секции наук о Земле РАЕН. Геолог., поиски и разв. рудн. месторождений.* 2014. – № 6 (49). – С. 68-81.
5. Смекалин О.П., Имаев В.С., Чипизубов А.В. Палеосейсмологические исследования в зоне Хустайского разлома // *Геология и геофизика.* – 2013. – № 7. – С. 940-951.
6. Шерман С.И., Адамович А.Н., Мирошниченко А.И. Моделирование и прогнозная оценка тектонической активности зон сочленений разломов // *Докл. РАН.* – 1987. – Т. 297. – № 4. – С. 824-828.
7. Dujardin J.-R, Bano M., Schlupp A., Ferry M., Munkhuu U., Tsend-Ayush N., Enkhee B. GPR measurements to assess the Emeelt active fault's characteristics in a highly smooth topographic context, Mongolia // *Geophys. J. Int.* – 2014. – Vol. 198. – P. 174-186.
8. Ferry M., Schlupp A., Ulzibat M., Munsch M., Fleury S., Baatarsuren G., Erdenezula D., Munkhsaikhan A., Ankhtsetseg D. Tectonic morphology of the Hustai fault (Northern Mongolia): A source of seismic hazard for the city of Ulaanbaatar // *Geophys. Res. Abstr.* – 2010. – Vol. 12. – EGU 2010-11122.
9. Seminsky K. Zh., Demberel S. The first estimations of soil-radon activity near faults in Central Mongolia // *The Radiat. measurements.* – 2013. – Vol. 49. – P. 19-34.
10. Ulzibat M., Ichihashi Y., Demberel S. Earthquake hazard in Ulaanbaatar city and its surrounding areas // *Proceedings of USMCA-2011.* – Thailand, 2011.

УДК 551.24

## **ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ТЫРКАНДИНСКОЙ ШЕАР ЗОНЫ (ЯКУТИЯ)**

**<sup>1</sup>Мельников А.И., <sup>2</sup>Смелов А.П., <sup>1</sup>Имаев В.С., <sup>2</sup>Тимофеев В.Ф., <sup>2</sup>Кравченко А.А.**

*<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 128, e-mail: mel@crust.irk.ru*

*<sup>2</sup>Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677000 Якутск, пр. Ленина, 39 e-mail: freshrock@yandex.ru*

**Деформации в Тыркандинской структуре, ранее выделенной как зона тектонического меланжа [1], происходили механизмом сдвигового течения горных пород и ее нужно относить к типичным зонам высоких деформаций (шеар зонам) [3]. Надвиговые смещения в ней преобладали только на самых ранних этапах формирования. На поздних этапах эволюции, вплоть до современного времени, более существенную роль играли сдвиговые смещения блоков, которые контролировали ее развитие, в том числе и сейсмичность этого региона.**

Ключевые слова: шеар зона, складки течения, линейность, милониты, деформации, ротация зерен, кинематика смещений

## **INTERNAL STRUCTURE TYRKANDINSKY SHEAR ZONES (YAKUTIA)**

**<sup>1</sup>Alexandr I. Mel'nikov, <sup>2</sup>Alexandr P. Smelov, <sup>1</sup>Valeriy S. Imaev, <sup>2</sup>Viktor F. Timofeev, <sup>2</sup>Alexandr A. Kravtchenko**

*<sup>1</sup>Institute of the Earth Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 128 Lermontova Str., e-mail: mel@crust.irk.ru*

*<sup>2</sup>Institute of geology of diamond and precious metals of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 677000 Yakutsk, Lenin's avenue, 39, e-mail: freshrock@yandex.ru*

**Deformations in Tyrkandinsky structure, before allocated as a zone of tectonic melange [1] occurred the mechanism of a shearing of rocks and it needs to be carried to typical zones of high deformations (shear zones) [2]. Thrusting displacement in it prevailed only at the earliest stages of formation. At late stages of evolution, up to the modern time, more essential role was played by shift displacement of blocks, which supervised its development, including seismicity of this region.**

Keywords: shear zone, plastic flow of folds, lineation, mylonite, deformations, rotation of grains, kinematics of displacement

Тыркандинская зона тектонического меланжа в северной части разделяет Восточно-Алданский и Центрально-Алданский гранулитовые террейны Алдано-Станового щита (Рис. 1А).

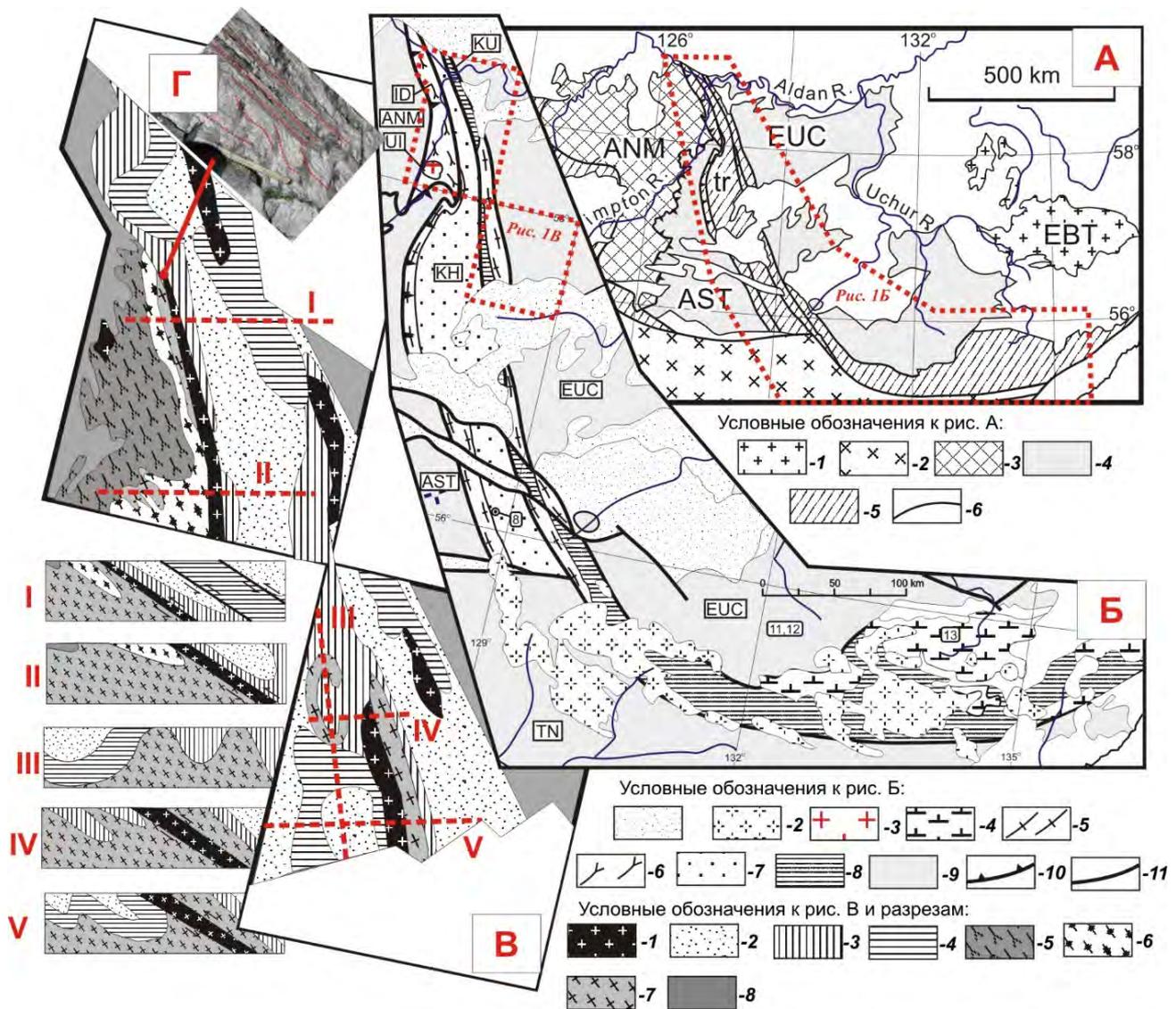


Рис. 1. Геология раннедокембрийских комплексов Тыркандинской shear зоны

**А – Положение shear зоны на карте террейнов Алдано-Станового щита [4].** Батомгский (ЕВТ) и Учурский (ЕУС) террейны образуют Восточно-Алданский супертеррейн, а Нимнырский (АНМ) и Сутамский (АСТ) террейны – Центрально-Алданский супертеррейн. Условные обозначения: 1-4 – террейны: 1 – гранит-зеленокаменный Батомгский; 2 – тоналит-грондземитогнейсовый Тындинский; 3 – гранулит-ортогнейсовый Нимнырский; 4 – гранулит-парагнейсовые Сутамский и Учурский; 5 – shear зоны Тыркандинская (tr) и Амгинская (am); 6 – разломы.

**Б – Структура shear зоны [3].** Условные обозначения: 1 – чехол Сибирской платформы; 2 – мезозойские сиениты, сиенит-порфиры, граносиениты; 3 – сшивающие раннепротерозойские чарнокиты, граниты и граносиениты; 4 – раннепротерозойские анортозиты; 5 – гнейсограниты; 6 – гиперстенновые, гиперстендиопсидовые, гиперстендиопсид-амфиболовые плагиогнейсы с прослоями и линзами двупироксен-амфиболовых кристаллических сланцев, известково-силикатных и диопсидовых пород; 7 – гранат-биотитовые плагиогнейсы с прослоями известково-силикатных пород, кварцитов и высокоглиноземистых гнейсов (холболохская толща); 8 – биотитовые, гранат-биотитовые, амфибол-биотитовые гнейсы, диопсидовые, известково-силикатные породы, кальцифилы (кюриканская толща); 9 – террейны Нимнырский (АНМ), Сутамский (АСТ), Учурский (ЕУС); 10 – надвиги; 11 – разломы.

**В – Структура северной части shear зоны.** 1 – сшивающие гранитоиды нерасчлененные; 2 – холболохская толща; 3 – холболохская Б толща (больше чем в 2 количество кристаллических сланцев [1]); 4 – кюриканская толща; 5 – иджекская толща; 6 – сеймская толща; 7 – ортогнейсовый комплекс; 8 – окружающие террейны.

**Г – Тектоническое несогласие в скальных выходах биотит-гранатовых гнейсов холболохской толщи.** Пунктиром выделено положение сланцеватости. Шарниры мелких складок течения с правым рисунком полого погружаются на СВ аз. пад. 10°, угол 15°, а линейность на ЮВ аз. пад. 160°, угол 25-35°. Сланцеватость аз. пад. 110-115°, угол 45-55°.

В её строении участвуют тектонические пластины, сложенные различными ассоциациями гнейсов обоих террейнов [4]. Ранее, согласно [1], были выделены следующие ниже по убыванию возраста ассоциации: 1) эндербито-, чарнокито- и гранитогнейсов (ортогнейсовый инфракрустальный комплекс); 2) гиперстеновых гнейсов и плагиогнейсов, гиперстен-диопсидовых и гиперстен-диопсид-амфиболовых плагиогнейсов, среди которых встречаются прослои и линзы двупироксен-роговообманковых кристаллических сланцев, известково-силикатных и диопсидовых пород, линзы и прослои гранат-биотитовых и гранат-гиперстен-биотитовых плагиогнейсов и гнейсов (иджекская толща); 3) биотитовых, гранат-биотитовых, амфибол-биотитовых, высокоглиноземистых гнейсов, кристаллических сланцев, диопсидовых, известково-силикатных пород, кальцифилов (кюриканская толща); 4) гранат-биотитовых плагиогнейсов с прослоями известково-силикатных пород, кварцитов, высокоглиноземистых гнейсов (холболохская толща) [2] (Рис. 1Б), наиболее крупные пластины, которых полого погружаются в восточном направлении [4] и ограничены узкими зонами бластомилонитов. В субдолготной ветви они насыщены телами гранитоидов [4].

Разрез от района устья р. Джелтулы до устья р. Улунчи сложен преимущественно гранитогнейсами и разнообразными мигматитами с редкими пластами гранат-биотитовых гнейсов и разорванными мигматизацией телами меланократовых пород. Сланцеватость, полосчатость разнообразна: от четко выраженной до слабой, теневой. Линейность разных типов (бугорчатость, минеральная линейность, шарниры мелких складок течения, длинные оси будин), обычно ориентирована по падению сланцеватости или под небольшим углом (Рис. 13). В мигматитах иногда наблюдаются реликты мелких, межслоевых (интрафолиальных), изоклинальных складок течения первой генерации формирование которых, вероятно, связано с ранним гранулитовым метаморфизмом. Вторая генерация мелких складок течения связана с мигматизацией раннего субстрата и наблюдается чаще вблизи разорванных тел меланократовых пород. Сланцеватость и линейность показывают широкое рассеяние по дуге большого круга (Рис. 2). В этих складках деформации подвергается уже и лейкосома мигматитов. В пределах этого участка разреза наблюдаются мелкие, непротяженные, узкие, хаотично ориентированные зоны сдвигового течения горных пород (шеаринга) с правой или левосторонней кинематикой смещения. Иногда фиксируются и взбросовые движения. Довольно редко встречаются участки с видимым S/C строением с такой же кинематикой. Зерна граната в гнейсах, хотя нередко и вытянуты по простиранию пластов, но, как правило, не деформированы. Мелкие зоны милонитов (от 10 до 30 см) наблюдаются также очень редко. Такое расположение зон шеаринга, обычно, характерно для районов развития купольной тектоники в высокометаморфизованных комплексах (Шарыжалгайский выступ, Анабарский щит, Восточно-Антарктическая платформа и др.). В целом, для этой толщи характерно

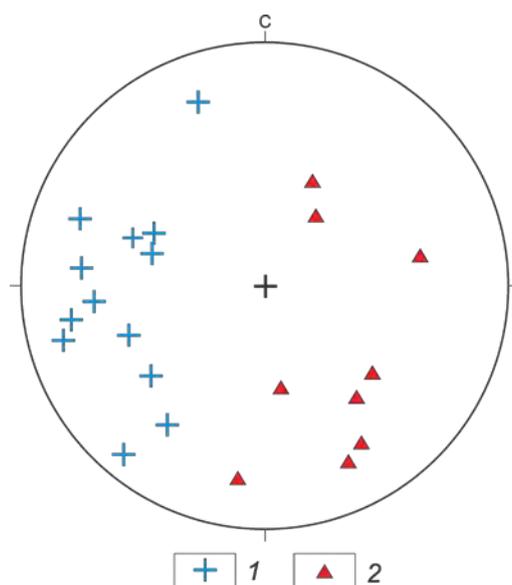


Рис. 2. Сводная диаграмма ориентировок сланцеватости (крестики) и линейности, шарниров мелких складок (треугольники) на участке р. Улунчи – р. Джелтула

внутрислойное перемещение вещества горных пород, в пределах границ пластов.

Разрез ниже устья р. Улунчи более пестрый. Сланцеватость, как правило, четкая, параллельно границам пластов, за исключением сильно деформированных участков. Мелкая складчатость течения развита в виде узких (до 100 м) зон (струй). Возможно, эти струи маркируют границы разных пластин, совмещенных в этой толще. Об этом же свидетельствует и широкое азимутальное и угловое рассеивание ориентировок сланцеватости, линейности и шарниров мелких складок, при общем северо-западном простирании сланцеватости (Рис. 3).

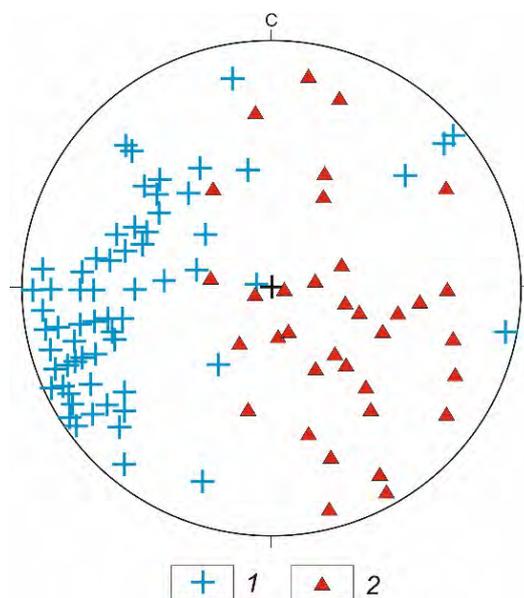


Рис. 3. Сводная диаграмма ориентировок сланцеватости (крестики) и линейности, шарниров мелких складок (треугольники) на участке р. Улунчи – р. Бол. Ыллымах

Ранние складки изоклинальные, внутрислойные и встречаются редко, только в виде реликтов, хотя иногда и образуют отдельные струи в общем матриксе породы. Амплитуда этих складок небольшая (первые десятки сантиметров). В биотит-гранатовых гнейсах зерна граната и их агрегатов, как правило, деформированы (Рис. 4). Среди порфирокласт преобладают дельта ( $\delta$ ) объекты с отчетливо выраженными крыльями и комплексные объекты с несколькими положениями крыльев. Вращение зерен граната отчетливо фиксируют левосторонние смещения в процессе деформации механизмом сдвигового течения горных пород (шеаринга). Размеры порфирокласт варьируют от первых миллиметров до нескольких сантиметров. Породы, в целом тонко разлинзованы с образованием отчетливо выраженных C/S строений. Ранняя сланцеватость S часто расположена косо к более поздней C – сланцеватости. Крупные порфирокласты граната, как правило, развиваются в пределах более меланократовых полос или вблизи контактов неосомы и меланосомы. Общая ориентировка C – сланцеватости аз. пад.  $70^\circ$ , угол  $70^\circ$ . Правосторонние и взбросовые смещения более ранние и встречаются значительно реже.

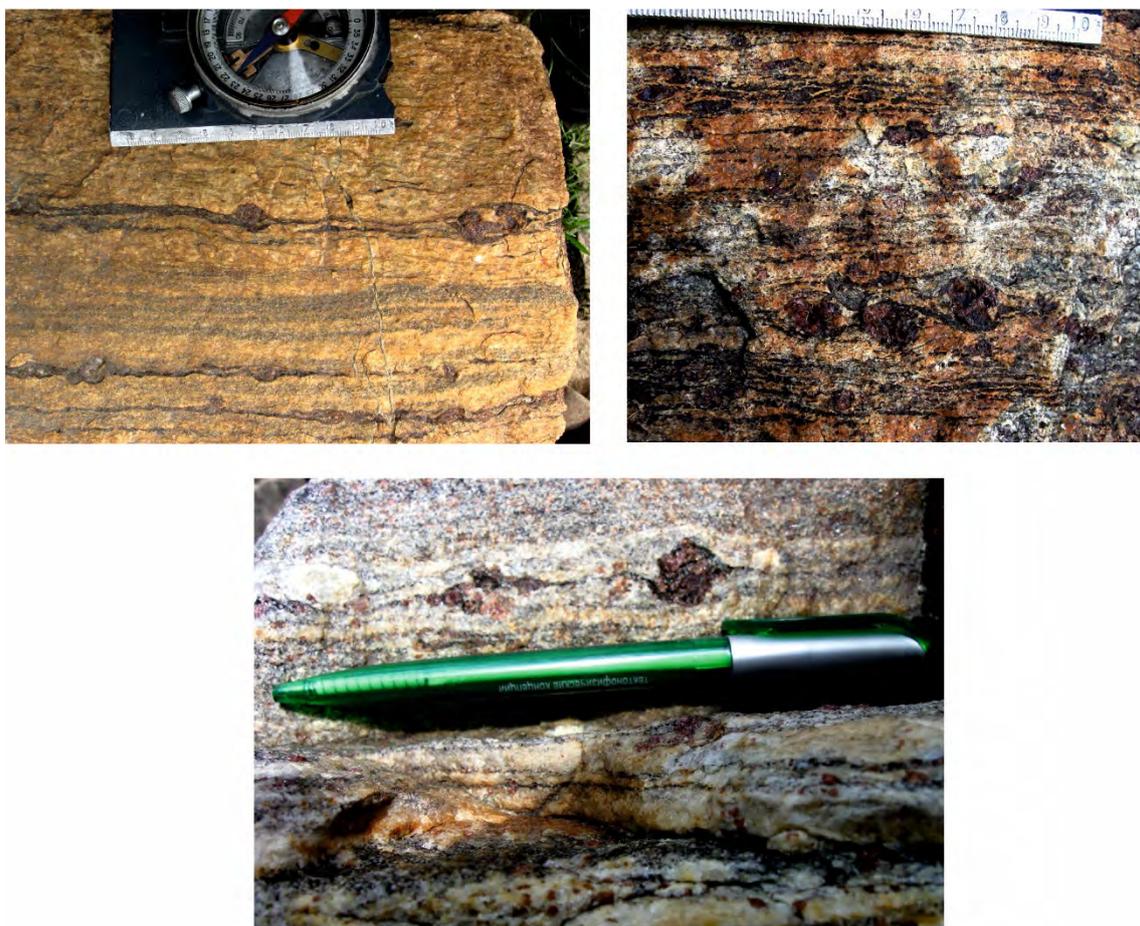


Рис. 4. Деформация порфирокласт граната в гнейсах. Отчетливо видны дельта объекты (нижнее фото) и комплексные объекты с разным положением крыльев (верхние фото). Положение крыльев указывает на вращение порфирокласт против часовой стрелки и левостороннее смещение при деформации

Зоны сдвигового течения с blastsмилонитами и милонитами встречаются также редко и, как правило, параллельны общему простиранию толщи. Зоны с четко выраженными S/C строениями наблюдаются довольно часто и, обычно, имеют левостороннюю сдвиговую кинематику, хотя в зонах интенсивного течения и бластеза нередки и дифференцированные (в обе стороны) смещения. Отчетливо фиксируется минимум две системы мигматизации: ранняя, преимущественно послойная и поздняя, более крупнозернистая артеритового типа, иногда с хаотически развитыми гнездами лейкосомы в породах.

Коренные, скальные обнажения северной части вдоль левого борта р. Тимптон ниже устья р. Ыллымах сложены биотитовыми, биотит-амфиболовыми с гиперстеном мигматизированными гнейсами. Сланцеватость аз. пад. 148-150°, угол 50-55°. Шарниры мелких изоклинальных складок погружаются на ЮВ аз. пад. 170°, угол 40°, ориентировка линейности совпадает с погружением шарниров складок. Далее по течению биотитовые с прослоями биотит-амфиболовых и биотит-гранатовых гнейсы Сланцеватость аз. пад. от 175° до 185°, угол 50-65°. В нижней части обнажения сланцеватость варьирует от 195° до 205°, угол от 60° до 70°. На плоскостях трещин аз. пад. 135°, угол 20° часто наблюдаются штрихи скольжения аз. пад. 160°, угол 15° (правый сдвиг). На диаграмме отмечается широкое рассеивание сланцеватости, при более концентрированном погружении (преимущественно пологом) линейных элементов строения (Рис. 5).

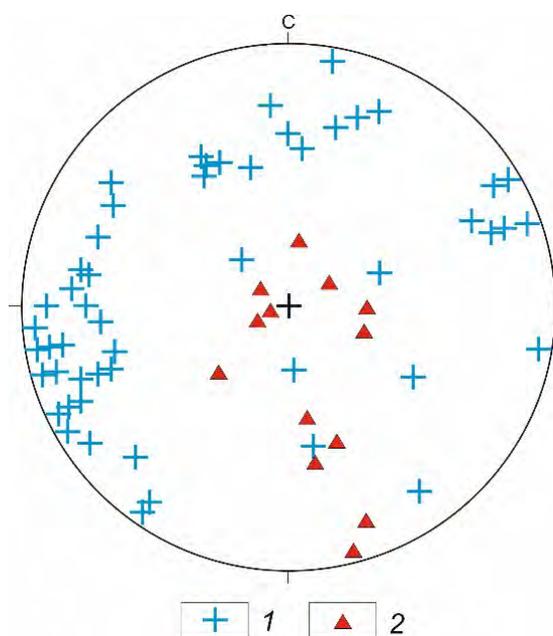


Рис. 5. Сводная диаграмма ориентировок сланцеватости (крестики) и линейности, шарниров мелких складок (треугольники) на участке р. Ыллымах – р. Алдан.

В правом борту р. Тимптон ниже устья руч. Тумул обнажены биотит-гранатовые и гранатовые гранулиты. Их сланцеватость варьирует в двух направлениях: от аз. пад.  $60^\circ$  до  $85^\circ$ , угол  $85-87^\circ$  и аз. пад.  $240^\circ$ , угол  $80-87^\circ$ . Иногда наблюдаются мелкие складки волочения левого рисунка с погружением шарниров по падению сланцеватости. Ниже по течению левый борт р. Тимптон сложен сильно мигматизированными биотитовыми и биотит-амфиболовыми гнейсами с прослоями биотит-гранатовых гнейсов мощностью до 3 м. Их сланцеватость четко выражена и имеет ориентировку аз. пад.  $85^\circ$ , угол  $60^\circ$ . В 300 м вниз по течению обнажена толща мигматизированных биотит-гиперстеновых гнейсов с маломощными прослоями биотит-гранатовых гнейсов и кальцифиров. Общая сланцеватость аз. пад.  $80^\circ$ , угол  $85^\circ$ , хотя иногда встречаются и ее противоположные падения. Породы смяты в две системы складок. Ранние мелкие изоклинальные складки течения с амплитудой до 0.6-0.8 м. Их шарниры круто погружаются на СЗ аз. пад.  $305^\circ$ , угол  $80^\circ$ . Эти складки деформируются более поздними открытыми складками с видимой амплитудой 0.3-0.4 м и шарнирами, погружающимися на ЮЗ аз. пад.  $245^\circ$ , угол  $80^\circ$ . Ниже по течению р. Тимптон в его правом борту обнажены сильно мигматизированные биотит-амфиболовые с мелким гранатом гнейсы. Сланцеватость аз. пад.  $60-80^\circ$ , угол  $70-80^\circ$ . Послойные или косо секущие инъекции пегматитов рассланцованы по системе аз. пад.  $240^\circ$ , угол  $85^\circ$ . Минеральная линейность, длинные оси будин и шарниры мелких складок погружаются на ЮВ аз. пад.  $160^\circ$ , угол  $45^\circ$ . По редким и мелким shear бендам здесь диагностируется левый сдвиг.

В правом борту р. Тимптон ниже устья р. Кюрюкян расположен массив интенсивно рассланцованных диоритов и гранодиоритов (Рис. 34). Сланцеватость варьирует от аз. пад.  $250^\circ$  до  $325^\circ$ , угол  $45-75^\circ$ . Часто наблюдаются молодые зеркала скольжения по системе трещин аз. пад.  $225^\circ$ ,  $85^\circ$  со штрихами скольжения аз. пад.  $145^\circ$ , угол  $10^\circ$  (правый сдвиг по правилу Гофера). Ниже по течению сланцеватость в гранодиоритах аз. пад.  $245^\circ$ , угол  $65^\circ$ , линейность по амфиболу аз. пад.  $165^\circ$ , угол  $05^\circ$ . Мелкие зонки катаклазитов шириной от 0.5 до 3-5 см развиты через 10-15 см и ориентированы аз. пад.  $235^\circ$ , угол  $80^\circ$ .

В левом борту р. Тимптон у его устья коренные выходы гранодиоритов. Сланцеватость аз. пад.  $60^\circ$ , угол  $80-85^\circ$ . Часто наблюдаются зоны милонитов мощностью 10-15 см аз. пад.  $65^\circ$ , угол  $75^\circ$ .

В коренных обнажениях левого борта р. Алдан против устья р. Тимптон обнажены интенсивно рассланцованные гранодиориты. Сланцеватость аз. пад.  $35-55^\circ$ , угол  $80-85^\circ$ . Выше по течению наблюдается чередование рассланцованных диоритов с зонами милонитов, бласто- и ультрамилонитов.

В целом, структурную последовательность деформаций центрального и северного отрезков Тыркандинской shear зоны можно представить, как следующую:

1. Ранний метаморфизм с формированием мелких интрафолиальных, изоклиальных складок течения.
2. Первичная, локальная мигматизация с формированием мелких изоклиальных складок течения, деформирующих первичную лейкоформу.
3. Массовая мигматизация толщи с развитием мелких, хаотично ориентированных shear зон с надвиговой, взбросовой или правосторонней кинематикой.
4. Третья генерация мелких изоклиальных складок течения. Развитие shear зон с бластомилонитами и милонитами с левосдвиговой кинематикой смещений, в том числе и по Тыркандинскому разлому, движения по которому, вероятно и спровоцировали формирование более мелких shear зон и S/C строений в его крыльях. Локально формирование S/C строений преимущественно левосдвиговой кинематикой. Деформация зерен граната и их ротация, преимущественно с левосторонней сдвиговой компонентой смещения.
5. Формирование простых открытых складок изгиба с варьирующей амплитудой.
6. Активные сдвиговые смещения, связанные с сейсмическими событиями в этом регионе.

### **Список литературы**

1. Дук В.Л., Кицул В.И., Петров А. Ф. и др. Ранний докембрий Южной Якутии (ред. Добрецов Н.Л.). - М.: Наука, 1986, 276 с.
2. Дук В.Л., Салье М.Е., Байкова В.С. Структурно-метаморфическая эволюция и флогопитоносность гранулитов Алдана. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1975. 227 с.
3. Мельников А.И., Никитин В.М. Зоны сдвигового течения горных пород (shear zone). Учебное пособие. - Иркутск-Нерюнгри: Изд-во Технического института (ф) СВФГУ, 2010. – 142 с.
4. Смелов А.П., Зедгенизов А.Н., Тимофеев В.Ф. Алдано-Становой щит // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). - М.: Наука / Интерпериодика, 2001. С. 81-104.

УДК 551.248(571.56)

## **РАЗВИТИЕ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЮЖНОЙ ЯКУТИИ**

**Козьмин Б.М.**

*Институт геологии алмаза и благородных металлов, Якутск, пр. Ленина, 39, e-mail:  
b.m.kozmin@diamond.ysn.ru*

**В работе приводится экскурс по развитию сейсмотектонических исследований в Южной Якутии за последние 50 лет. Рассматриваются сведения об учёных, научных организациях и результатах их работ по названной тематике.**

Ключевые слова: сейсмичность, сейсмотектоника, сейсмическое районирование, фокальный механизм землетрясения, Байкало-Становой сейсмический пояс, Южная Якутия.

## **THE DEVELOPMENT OF SEISMOTECTONIC STUDIES IN SOUTH YAKUTIA**

**Kozmin B.M.**

*Diamond and precious metal geology institute SB RAS, Yakutsk, Lenina pr., 39, e-mail:  
b.m.kozmin@diamond.ysn.ru*

**The paper gives insight into the development of seismotectonic studies in South Yakutia over the past 50 years. We consider the information about scientists, scientific organizations and the results of their work on above topics.**

Key words: seismicity, seismotectonics, seismic zoning, focal mechanism of earthquake, Baikal-Stanovoy seismic belt, South Yakutia.

Начало сейсмологических исследований на территории Республики Саха (Якутия) относится к 60-м годам XX века, когда были проведены первые инструментальные наблюдения за землетрясениями Якутии. Тогда Якутский Филиал СО АН СССР возглавлял академик Н.В. Черский. Он понимал важность и необходимость изучения местной сейсмичности, в особенности в связи с активным промышленным и гражданским строительством на территории республики. Поэтому на работу в ЯФ СО РАН СССР был приглашен молодой специалист, только что закончивший МГУ, В.М. Кочетков, который стал организатором сейсмической станции в г. Якутске, начавшей регистрацию местных землетрясений в 1957 г.

Следует отметить значительную поддержку в организации геофизических исследований в Якутии и на Северо-Востоке СССР известных учёных (геологов, сейсмологов и тектонистов). К их числу относятся Е.Ф. Саваренский, Д.П. Кирнос, Н.В. Шебалин, Н.В.

Кондорская и др. (Институт Физики Земли АН СССР, г. Москва), а также сибирские учёные – А.А. Тресков, В.П. Солоненко, К.В. Пшенников, Л.А. Мишарина и др. (Институт земной коры СО АН СССР, г. Иркутск).

Для регистрации землетрясений в г. Якутске на его окраине был выбран участок территории с минимальным уровнем помех, где было построено специальное здание, а для установки сейсмоприёмников выкопана вертикальная шахта глубиной 11 м. Это позволило иметь в условиях вечной мерзлоты стабильную температуру на дне шахты ( $-4^{\circ}\text{C}$ ) в любое время года, что особенно важно для стабильной эксплуатации приборов. Упомянутое сооружение функционирует и сейчас. При этом запись сейсмических событий в 1957 г. производилась на фотобумагу (аналоговая запись), в отличие от современной цифровой записи на компьютер. Уже в первый год работы сейсмостанция «Якутск» зарегистрировала два сильных 9-балльных землетрясения (Олёминское и Нюкжинское 1958 г.) в Южной Якутии, где в последствии была развёрнута сеть сейсмических станций. Так, первые пункты наблюдений были открыты в Чульмане и Усть-Нюкже (1964 г.) [Кочетков В.М.]. Это позволило создать при ЯФ СО АН СССР сейсмическую лабораторию, первым руководителем которой являлся В.М. Кочетков. С этого момента стал проводиться постоянный мониторинг за землетрясениями Южной Якутии.

В конце 1964 г. лаборатория сейсмологии была передана в состав Института геологии ЯФ СО АН СССР. Кроме сейсмологических наблюдений в лаборатории развивались сеймотектонические исследования. Такие работы впервые были проведены в эпицентральных областях названных землетрясений 1958 г. В дальнейшем макросейсмическое обследование эпицентральных зон сильных сейсмических событий стало нормой. Так, были изучены сеймотектонические деформации и сеймопроявления в эпицентре 9-10-балльного Тас-Юряхского землетрясения 1967 г., 7-8-балльного Ларбинского землетрясения 1971 г., 8-балльного Южно-Якутского подземного толчка 1989 г. и др. С появлением в составе сейсмологического подразделения молодых специалистов из МГУ, Иркутского и Якутского госуниверситетов и привлечением сотрудников из смежных лабораторий Института геологии ЯФ СО АН СССР в 1971-1975 гг. был создан авторский коллектив для выполнения исследований по общему сейсмическому районированию территории Якутии. Работы проводились под руководством директора Института геологии д.г.-м.н., проф. К.Б. Мокшанцева, в ней приняли участие специалисты других научных направлений, в том числе тектонисты: Г.С. Гусев и А.Ф. Петров, неотектонисты и геоморфологи: О.В. Гриненко и З.Ф. Бороденкова, геофизики: Г.И. Штех и И.Г. Сафиулин. Итогом этой работы явилась «Карта общего сейсмического районирования территории

Якутии» м-ба 1:2.5 млн. [Сейсмическое районирование Якутии..., 1975], которая вошла составной частью в «Карту общего сейсмического районирования территории СССР» 1978 г.

В 1968 г. лабораторию сейсмологии возглавил Б.М. Козьмин, который продолжил развивать сеть сейсмических наблюдений. В частности, в 1975-1979 гг. была организована временная сеть станций Института геологии ЯФ СО АН СССР по заданию Госкомитета по науке и технике при СМ СССР для выполнения проекта: «Проведение исследований сейсмических наблюдений с целью детального изучения сейсмического режима наиболее сеймоактивных участков района строительства БАМ и мест расположения ответственных сооружений». В данном проекте кроме сейсмологов участвовали сейсмогеологи как из Института геологии ЯФ СО АН СССР (В.С. Имаев, В.Ф. Тимофеев), так и Института земной коры СО АН СССР (В.П. Солоненко, С.Д. Хилько, В.В. Николаев, О.В. Павлов, Р.Ф. Семенов и др.). Полученные по данной теме результаты дали возможность провести детальное районирование трассы БАМ, которые были отражены в коллективной монографии «Геология и сейсмичность зоны БАМ», опубликованной в 1983-1985 г. в издательстве «Наука» в 8 томах. Редактором этого издания был зам. директора ИЗК СО АН СССР, член-корреспондент АН СССР В.П. Солоненко [Солоненко и др., 1985].

В 1979 г. сеть станций выделилась в самостоятельное подразделение – Якутскую опытно-методическую сейсмологическую партию, которая затем вошла составной частью в Геофизическую службу СО РАН. В дальнейшее развитие системы наблюдений за землетрясениями Южной Якутии свой вклад внесли А.Г. Ларионов (1979-1999 гг.) и С.В. Шibaев (2000 г. по настоящее время). В результате число станций здесь выросло с 2-х (1964 г.) до 10 (2014 г.). Кроме постоянной системы наблюдений в случае крупных сейсмических катастроф, сопровождаемых повторными толчками, в их эпицентральных зонах устанавливались группы временных полевых пунктов, регистрирующих афтершоки, как это было при сильных подземных толчках в 1967 г., 1971 г., 1989 г. и 2005 г. [Козьмин, 1984].

В 1990 г. лаборатория сейсмологии в связи с расширением профиля исследований сменила название на лабораторию сейсмологии и геодинамики, т.к. её сейсмологическое направление было дополнено комплексом работ по сеймотектонике и структурной геологии (В.С. Имаев), изучению рельефа и неотектонике (Л.П. Имаева), стратиграфии кайнозойских отложений (О.В. Гриненко). В последующий 5-летний период на юге РС(Я) произошло одно из сильнейших сейсмических событий – Южно-Якутское землетрясение 1989 г. с интенсивностью в эпицентре до 8 баллов. Многие жители г. Нерюнгри хорошо помнят панику, которая возникла в момент главного толчка, а также при появлении его сильных афтершоков, где их воздействия достигали 5-6 баллов. Многие жители боялись возвращаться в свои благоустроенные квартиры и ночевали в дачных домиках. Это событие ощущалось на

территории Южной и Центральной Якутии, севере Бурятии, Иркутской, Читинской и Амурской областей и севере КНР на площади около 1.5 млн.км<sup>2</sup> [Козьмин и др., 1992]. Следует отметить, что изучение проявлений Южно-Якутского землетрясения было проведено усилиями трёх академических институтов: ИГ ЯФ СО АН СССР (Якутск), ИЗК СО АН СССР (Иркутск) и СахКНИИ ДВО АН СССР (Южно-Сахалинск) с использованием данных сети станций Якутской Опытной-методической сейсмологической партии (А.Г. Ларионов) и Байкальской ОМСП СО АН СССР (Масальский О.К.). В этих исследованиях также участвовали сотрудники Якутского госуниверситета (А.С. Статива) и работники Якутского аэрогеодезического предприятия (Г.В. Бочаров). Результаты данной работы, где кроме сейсмотектонических характеристик Южно-Якутского землетрясения выявлены его предвестники, были опубликованы в ряде статей, препринтах и доложены на Всесоюзных конференциях и симпозиумах в Москве, Хабаровске, Иркутске, Нерюнгри, Якутске и др.

Сегодня на территории Южной Якутии и прилегающих районах Забайкалья и Приамурья действует обширная система инструментальных сейсмологических наблюдений Якутского, Байкальского и Сахалинского филиалов Геофизической службы СО РАН и ГС РАН, а также Технического института СВФУ (Нерюнгри), состоящая из более, чем 50 сейсмостанций, оснащённых новейшей цифровой аппаратурой как отечественного, так и зарубежного производства. Она обеспечивает проведение мониторинга за сейсмичностью данного региона и позволяет без пропусков фиксировать все сейсмические события с интенсивностью до 1 балла. За 50-летний период наблюдений в регионе зарегистрировано свыше 40 тысяч местных землетрясений, в их числе более 30 крупных сейсмических событий с интенсивностью в эпицентре до 7-10 баллов. На основе этих данных по пространственно-временному распределению эпицентров землетрясений совместно с американскими учёными из Университета штата Мичиган (К.Д. Маккей, К. Фуджита и др.) и российскими исследователями из ИЗК СО РАН, ИГ ЯФ СО РАН, ИТИГ, СВКНИИ и ИМГиГ ДВО РАН, а также ГС РАН и ГС СО РАН была составлена детальная карта сейсмичности Восточной Сибири и Дальнего Востока за 1960-2007 гг. [Maskey et al., 2010] На ней в пределах Республики Саха (Якутия) отчётливо выделяются два крупных сейсмических пояса: Арктико-Азиатский на северо-востоке и Байкало-Становой на юге региона. На рисунке 1, Б приведён фрагмент названной карты, показывающей расположение Байкало-Станового сейсмического пояса, вытянутого в широтном направлении от оз. Байкал через Забайкалье и Южную Якутию к Охотскому морю. Пояс маркирует границу крупных литосферных плит (Евразийской и Амурской) [Имаев и др., 2000].

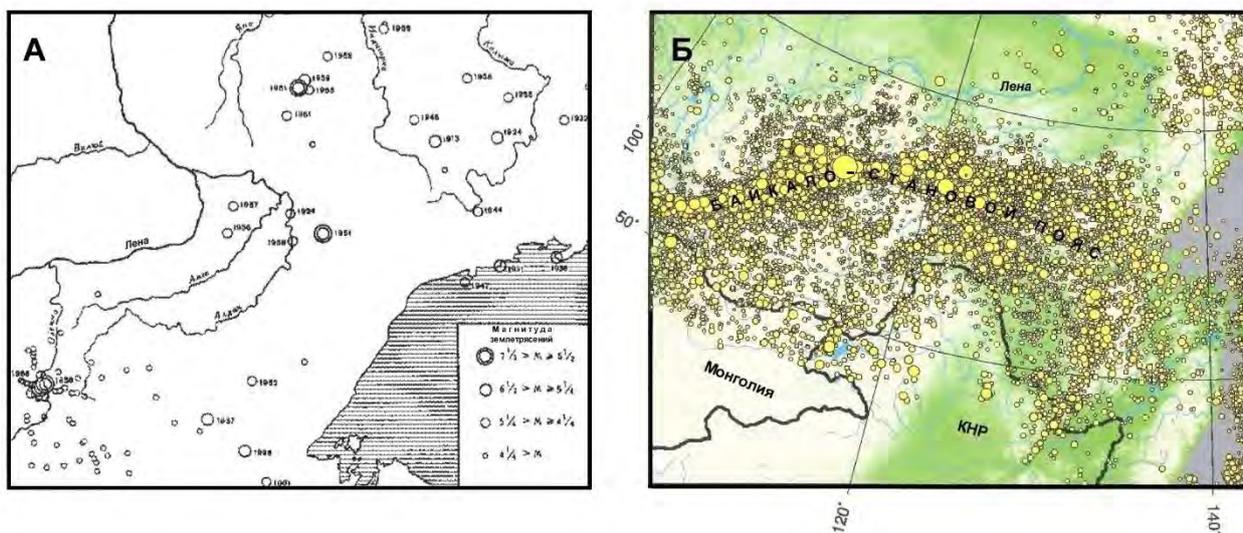


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Южной Якутии в 1964 г. (А) и в 2014 г. (Б).

Сравнение двух карт сейсмичности с момента появления первых сейсмостанций в Южной Якутии в 1964 г. и современного распределения эпицентров землетрясений (Рис. 1, А и Б) уверенно показывает насколько пополнилась «картина» сейсмических проявлений в первоначальный и настоящий период наблюдений. Определение фокальных механизмов сильных южноякутских землетрясений позволило обосновать тип геодинамического режима на границе рассматриваемых плит. В частности, было установлено, что в Байкало-Становом сейсмическом поясе режим растяжения земной коры, характерный для Байкальского рифта, в бассейне р. Олёкмы сменяется сжатием в Олёкмо-Становой сеймотектонической зоне в Южной Якутии [Козьмин, 1984].

Изучение эпицентральных областей катастрофических землетрясений и сопровождающих их сеймотектонических деформаций земной коры [Солоненко и др., 1966], составление компьютерных баз инструментальных данных, построение набора карт по сейсмичности и макросейсмическим проявлениям, сведения по «живой» тектонике и геофизическим полям послужили количественной основой для построения карт сейсмического районирования территории РС(Я), в том числе Южной Якутии, использованные также при построении карты сейсмического районирования Российской Федерации 1997 и 2012 гг.

Следует отметить, что кроме уже названных академических институтов в последние 20 лет к изучению сейсмичности и сейсмической опасности Южной Якутии активно подключились Академия наук РС(Я) (И.И. Колодезников), исследователи из Технического Института СВФУ, г. Нерюнгри (Н.Н. Гриб, В.С. Имаев, С.В. Трофименко и др.). Благодаря координации исследований с учёными Москвы, Иркутска, Якутска, Хабаровска др. были выполнены научно-исследовательские работы по оценке сейсмической опасности ряда

крупных народно-хозяйственных объектов. действующих и проектируемых при реализации мегапроекта «Комплексное развитие Южной Якутии». В частности, изучено сейсмическое состояние территории Эльгинского угольного месторождения, Тарыннахского ГОКа, Эльконского ГМК и др. Одной из таких последних работ является оценка сейсмической опасности ныне действующего нефтепровода ВСТО, где головной организацией выступил Институт физики земли РАН, г. Москва (Е.А. Рогожин, А.Н. Овсяченко, А.В. Мараханов и др.).

Результаты сейсмологических, сейсмотектонических и геологических исследований в Южной Якутии за последние 15 лет отражены на региональных сейсмотектонических картах, а также ряде коллективных монографий, опубликованных при поддержке РФФИ, СО РАН, Академии наук РС(Я) и СВФУ. К их числу относится «Карта сейсмотектоники Восточной Сибири» (2015г.), монографии: «Сейсмотектоника Якутии» (2000г.), «Сейсмогенерирующие структуры Байкало-Патомского и Алдано-Станового блока (анализ трассы нефтепровода ВСТО)» (2008г.), «Опасные геологические процессы на юге Якутии и сопредельных территориях» (2011г.), «Эволюция сейсмотектонических процессов восточного фланга Байкальской рифтовой зоны» (2012г.) и др.

Всё это свидетельствует, что благодаря конструктивному сотрудничеству перечисленных научно-исследовательских организаций накоплен значительный научный задел, позволяющий переходить от общего к детальному и микросейсмическому районированию данного региона. Это даёт возможность также обеспечить не только проведение постоянного мониторинга за сейсмичностью и сейсмотектоническими процессами в земной коре, но и выполнять оперативное комплексное научное сопровождение планируемых стратегических объектов промышленности и инфраструктуры, предусмотренных мегапроектом «Комплексное развитие Южной Якутии».

### **Список литературы**

Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмотектоника Якутии – М.: ГЕОС, 2000. – 227 с.

Козьмин Б.М. Сейсмические пояса Якутии и механизм очагов их землетрясений. – М.: Наука, 1984. – 125 с.

Козьмин Б.М., Голенецкий С.И., Николаев В.В., Имаев В.С. Имаева Л.П. и др. Южно-Якутское землетрясение 20 апреля 1989 года. Препринт. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1992. – 45 с.

Кочетков В.М. Сейсмичность Якутии. – М.: Наука, 1966. – 92 с.

Сейсмическое районирование Якутии и сопредельных территорий. / ред. К.Б. Мокшанцев. – Якутск: Якутское книжн. изд-во, 1975. – 92 с.

Солоненко В.П., Тресков А.А., Курушин Р.А., Мишарина Л.А., Павлов О.В., Пшеников К.В., Солоненко М.А., Фомина Е.В., Хилько С.Д. Живая тектоника, вулканы и сейсмичность Станового нагорья. – М.: Наука, 1966. – 231 с.

Солоненко В.П., Николаев В.В., Семёнов Р.М., Демьянович М.Г., Курушин Р.А., Хромоских А.В., Чипизубов А.В. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Сейсмогеология и сейсмическое районирование. – Новосибирск: Наука, 1985. – 190 с.

Mackey K.G., Fujita K., Hartse H.E., Stead R.J., Steck L.K., Gunbina L.V., Leyshuk N., Shibaev S.V., Koz'min B.M., Imaev V.S., Gordeev E.I., Chebrov V.N., Masal'ski, Gileva N.A., Bormatov V.A., Voitenok A.A., Levin Y.N. and Fokina T.A. Seismicity map of Eastern Russia, 1960-2010 // *Seismological Research Letters*. 2010. V.81, № 5. С. 761-768.

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОЧАГОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЮЖНОЙ ЯКУТИИ ПО ПОВЕРХНОСТНЫМ ВОЛНАМ

<sup>1</sup>Середкина А.И., <sup>2</sup>Козьмин Б.М.

<sup>1</sup>*Институт земной коры СО РАН, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, e-mail: ale@crust.irk.ru*

<sup>2</sup>*Институт геологии алмаза и благородных металлов, Якутск, пр. Ленина, 39, e-mail: b.m.kozmin@diamond.ysn.ru*

В работе приведены результаты определений тензора сейсмического момента (ТСМ) землетрясений Южной Якутии по амплитудным спектрам поверхностных волн. Всего ТСМ рассчитан для четырех сейсмических событий с  $M_w=4.1-5.4$ , произошедших на территории региона с 2008 по 2014 г. Был выполнен сеймотектонический анализ полученной информации.

Ключевые слова: тензор сейсмического момента землетрясения, поверхностные волны, Южная Якутия, Олёкмо-Становая зона, фокальный механизм, активный разлом, кинематика разлома

## DETERMINATION OF THE EARTHQUAKE SOURCE PARAMETERS IN SOUTH YAKUTIA FROM SURFACE WAVE DATA

<sup>1</sup>Seredkina A.I., <sup>2</sup>Kozmin B.M.

<sup>1</sup>*Institute of the Earth's crust SB RAS, Irkutsk, Lermontova st., 128, e-mail: ale@crust.irk.ru*

<sup>2</sup>*Diamond and precious metal geology institute SB RAS, Yakutsk, Lenina ave., 39, e-mail: b.m.kozmin@diamond.ysn.ru*

We described seismic moment tensor (SMT) determinations of the earthquakes in South Yakutia from the data on surface wave amplitude spectra. In total the SMT has been calculated for four seismic events with  $M_w=4.1-5.4$ , occurred in 2008–2014. Seismotectonic analysis of observed information was made.

Key words: seismic moment tensor, earthquake, surface waves, South Yakutia, Olekma-Stanovoy zone, focal mechanism, active fault, kinematics of fault

### Введение

Тензор сейсмического момента (ТСМ), как известно, содержит достаточно полную информацию об очаге (его энергии и механизме), которую можно извлечь из наблюдений сейсмических сигналов с длинами волн намного превышающими размеры источника. Для землетрясений с  $M \geq 5.0$  оперативные данные о ТСМ предоставляет ряд сейсмологических агентств (GCMT, NEIC, USGS). Как правило, в различных регионах на долю таких событий приходится не более 1%. Не составляет исключения и Южная Якутия, где для основной массы

землетрясений рутинная обработка ограничивается оценкой их фокальных механизмов по знакам первых вступлений продольных сейсмических волн, зарегистрированных короткопериодной аппаратурой, а специальным исследованиям ТСМ посвящено не так много публикаций [Emmerson et. al., 2006; Sloan et al., 2011].

В данной работе для землетрясений Южной Якутии средних магнитуд рассчитан ТСМ по амплитудным спектрам поверхностных волн, проведено сопоставление полученных результатов с литературными данными, а также кратко рассмотрена сеймотектоническая позиция очагов исследуемых сейсмических событий.

### Материалы и методы исследования

Для решения поставленных задач использовались сведения о 4 землетрясениях с  $mb=4.1-5.4$ , произошедших на территории Южной Якутии за период с 2008 по 2014 г. (табл. 1).

Таблица 1

Параметры исходных данных

№	Дата, г м ч	$t_0$ , ч мин с	Эпицентр		$mb$	$\Delta_{min}$ , км	$\Delta_{max}$ , км	$\Delta T$ , с	N	Модель коры
			$\varphi^\circ$ , E	$\lambda^\circ$ , N						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2008.11.08	08:45:55.8	56.83	123.20	5.0	2171	8921	30-55	8	2
2	2008.12.01	16:24:10.0	57.32	120.53	4.1	2445	4491	30-50	9	1
3	2009.01.26	18:51:59.1	57.40	120.78	5.2	2428	7003	30-90	15	1
4	2014.01.04	19:34:25.6	56.80	129.50	5.4	3243	5627	40-90	11	2

Примечание. Столбцы: 2 – дата (год, месяц, число); 3 – время в очаге по Гринвичу (час, минута, секунда); 4, 5 – координаты эпицентра; 6 – магнитуда по объемным волнам (по ISC); 7, 8 – минимальное и максимальное эпицентральные расстояния соответственно; 9 – диапазон периодов; 10 – число используемых станций; 11 – модель коры в окрестности очага землетрясения: 1 – 3SMAC, 2 – CRUST 2.0 (см. текст).

Материалом исследования служили записи выбранных землетрясений на широкополосных каналах цифровых сейсмических станций сетей IRIS. Положение станций выбиралось таким образом, чтобы они находились в разных азимутах от эпицентра рассматриваемого события (Рис. 1, А). Минимальное используемое эпицентральное расстояние составило около 2000 км, а максимальное – около 9000 км (табл. 1).

Спектры основной моды волн Рэлея и Лява были получены для каждой трассы «эпицентр-станция» с помощью метода спектрально-временного анализа [Левшин и др., 1986] в диапазоне периодов колебаний от 30 до 90 с (табл. 1). Анализу подвергались только сейсмограммы с высоким соотношением сигнал/шум и нормальной поляризацией.

ТСМ (в приближении двойной пары сил – double-couple) и глубина гипоцентра рассчитывались по полученным амплитудным спектрам поверхностных волн с привлечением дополнительной информации о знаках первых вступлений объемных волн на региональных станциях [Букчин, 1989, Lasserre et al., 2001]. Корректность применения данного метода к

региональным сейсмическим событиям средних магнитуд рассмотрена в работе [Середкина, Мельникова, 2014].

Строение земной коры под сейсмическими станциями задавалось моделью 3SMAC [Nataf, Ricard, 1996] в окрестности очага землетрясения – моделями CRUST 2.0 [Bassin et al., 2000] или 3SMAC, в зависимости от того, какая из них обеспечит меньшее значение функции нормированной невязки. Для описания верхней мантии и расчета затухания поверхностных волн использовалась сферически симметричная модель PREM [Dziewonski, Anderson, 1981]. Оценка качества полученного решения производилась с помощью функции нормированной невязки ( $\epsilon$ ) [Lasserre et al., 2001].

### Результаты исследования

Результаты расчетов ТСМ рассматриваемых землетрясений приведены на рисунке 1 (Б, В) и в таблице 2.

Таблица 2

Очаговые параметры исследуемых землетрясений

№	Дата, г м ч	$M_0 \cdot 10^{17}$ , Н·м	$M_w$	Ось Т (растяжения)		Ось Р (сжатия)		Ось В (промежуточная)		$\epsilon$
				AZM°	PL°	AZM°	PL°	AZM°	PL°	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2008.11.08	0.160	4.8	125	37	33	3	299	53	0.297
2	2008.12.01	0.044	4.4	172	52	318	33	59	17	0.271
3	2009.01.26	2.300	5.5	168	31	337	59	75	5	0.313
4	2014.01.04	1.500	5.4	138	27	256	42	26	36	0.322

Примечание. Столбцы: 2 – дата (год, месяц, число); 3 – скалярный сейсмический момент; 4 – моментная магнитуда; 5–10: параметры осей растяжения (Т), сжатия (Р) и промежуточной оси (В): AZM – азимут оси, PL – угол погружения; 11 – значение функции нормированной невязки.

Необходимо отметить, что для землетрясений 26 января 2009 г. и 4 января 2014 г. имеется информация о ТСМ в GСMT-каталоге. При этом решения фокальных механизмов, оценки скалярного сейсмического момента и моментной магнитуды достаточно хорошо согласуются между собой. Для первого сейсмического события значение глубины гипоцентра, рассчитанное в данной работе, также не противоречит данным GСMT-каталога (12 км) и результатам [Sloan et al., 2011] (8 км). Для второго землетрясения разброс в значениях глубины очага составляет около 13 км (GСMT-каталог:  $h=20.9$  км). Похожие закономерности при определении глубин гипоцентров различными методами были отмечены ранее для землетрясений Прибайкалья [Середкина, Мельникова, 2014].

### Сейсмотектонический анализ

С целью выявления взаимосвязей сейсмологических данных с геолого-геофизическими сведениями параметры фокальных механизмов землетрясений Южной Якутии, построенные по амплитудным спектрам поверхностных волн, сопоставлялись с данными обработки

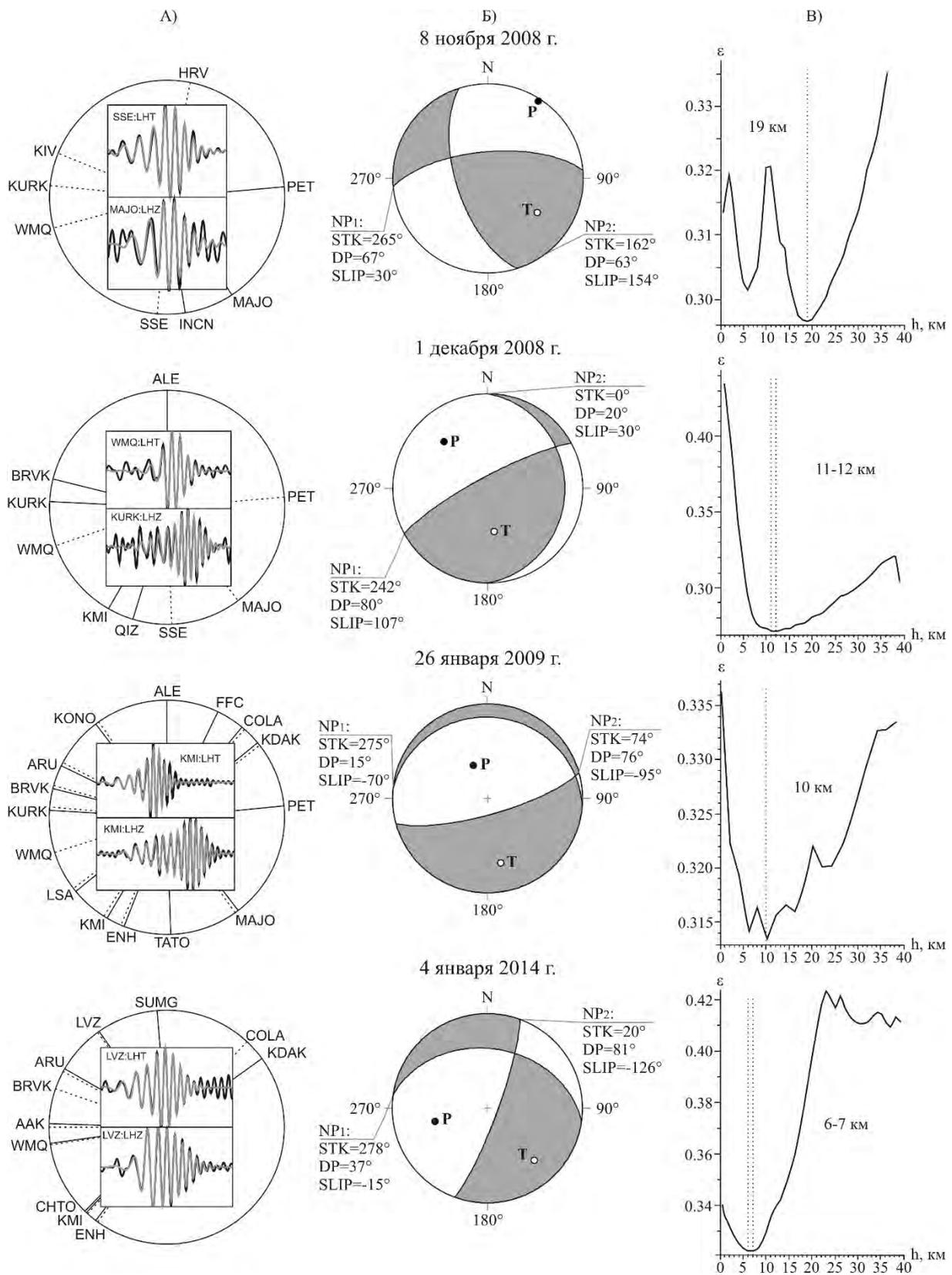


Рис. 1. Азимутальное распределение сейсмических станций, используемых для анализа очаговых параметров (А), механизм очага (в проекции нижней полусферы) (Б) и зависимость функции нормированной невязки от глубины очага (В) для исследуемых землетрясений

### Южной Якутии

Коды сейсмических станций соответствуют международному стандарту.

макрсейсмических проявлений этих событий, пространственным расположением их афтершоковых последовательностей и морфо-кинематической характеристикой активных разломов, к которым были приурочены эпицентры отмеченных подземных толчков. Все очаги рассмотренных землетрясений произошли в пределах Олёкмо-Становой сеймотектонической зоны (ОСЗ) в Южной Якутии, протягивающейся от р. Олёкмы к Охотскому морю, где господствует сеть разрывных нарушений субширотного регионального Станового структурного шва архейского возраста [Горнштейн и др., 1976].

Именно в центральной части ОСЗ в зоне влияния Станового шва произошло Алданское землетрясение 2008 г. (№ 1, табл.1). По геологическим данным для этого разлома характерны сдвиговые и взбросо-надвиговые движения [Имаев и др., 2000]. Сравнение решения фокального механизма события 2008 г. со структурными элементами Станового разлома указывает, что плоскость разрыва последнего ассоциируется с нодальной плоскостью  $NP_1$  в очаге землетрясения, ориентированной также субширотно, по которой отмечены левобокковые подвижки (Рис. 1, Б).

В широтном направлении, как и плоскость  $NP_1$ , расположились изосейсты Алданского землетрясения, вытянутые по простиранию Станового шва (Рис. 2, Б). Однако серия афтершоков этого толчка была ориентирована субдолготно (Рис. 2, А) в соответствии с положением нодальной плоскости  $NP_2$ , которая совпадает по простиранию с новейшим локальным разломом, пересекающим с юга на север древний Становой шов вдоль р. Алдан. Таким образом, каждая из выявленных в очаге плоскостей разрыва была по-своему «рабочей».

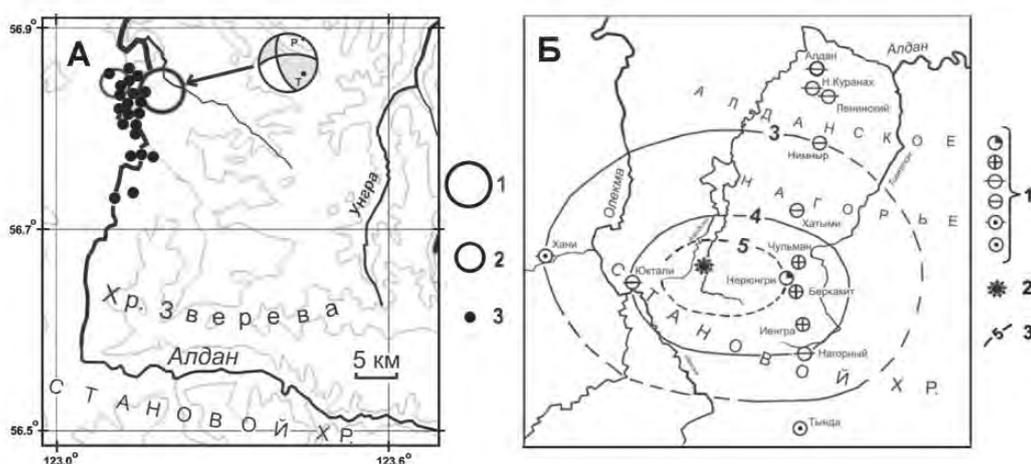


Рис. 2. Особенности проявлений Алданского землетрясения 8 ноября 2008 г. в Южной Якутии

А – пространственное распределение эпицентров: 1 – главное событие ( $M_w=4.8$ ,  $K_p=13.5$ ); 2-3 – афтершоки: 2 –  $K_p=9-10$ , 3 –  $K_p \leq 8$ . Отдельно показана стереограмма главного толчка (по данным Рис. 1). Б – карта изосейст. 1 – интенсивность сотрясений в баллах шкалы MSK-64, 2 – инструментальный эпицентр, 3 – изолинии балльности.

Два последующих решения очаговых параметров принадлежат сотрясениям, произошедшим в 2008-2009 гг. на территории Олёкмо-Чарского нагорья в зоне перехода от северо-восточного окончания Байкальского рифта к западному флангу ОСЗ (табл. 1 и 2). Исследуемые подземные толчки относятся к роевым, составляющим Чаруодинский рой землетрясений, возникший в 2005 г., но действующий до сих пор. За прошедшие 10 лет здесь зарегистрировано около 5 тыс. роевых событий [Шибаяев и др., 2011]. В пределах данного роя известны три сильных ощутимых землетрясения (два в 2005 г. и одно в 2009 г.) с  $M_w=5.4-5.8$ . Для всех них подвижки в очаге согласно каталога GCMT и нашего решения 2009 г. соответствовали сбросам. По этим данным можно утверждать, что здесь господствует стабильный рифтовый режим. Однако параметры механизма очага события 2001 г. (табл. 2, №2 и Рис.1) показывают, что режим растяжения может в отдельных случаях сменяться режимом сжатия (взбросо-надвиговые смещения в очаге).

Последнее землетрясение (табл. 1 и 2, №4) произошло на восточном краю ОСЗ примерно в 100 км к северу от зоны Станового разлома на территории Алданского нагорья. Его эпицентр приурочен к разломному узлу, образованному Тыркандинским региональным дизъюнктивом северо-западного простирания и субширотным Гонамским локальным нарушением (Рис. 3).

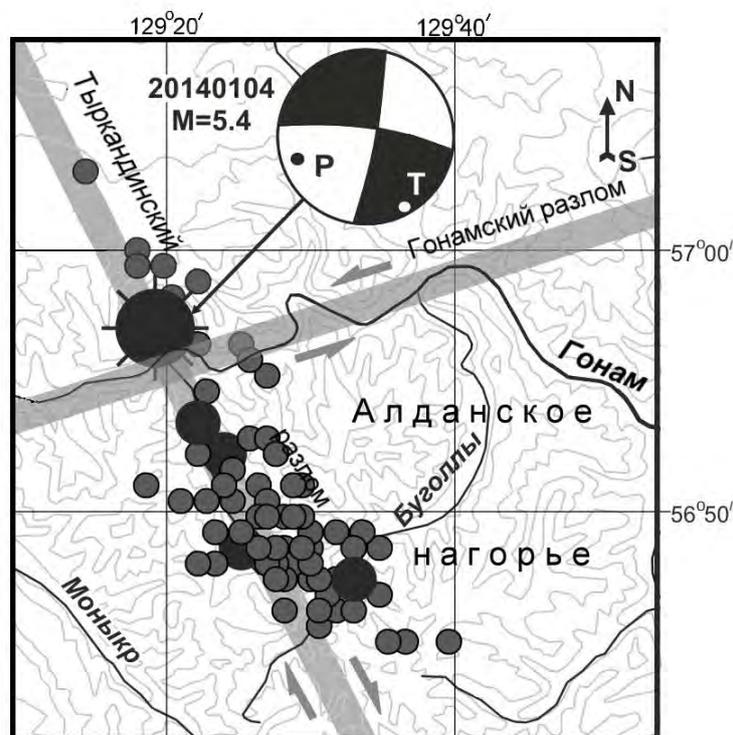


Рис. 3. Проявления Гонамского землетрясения 2014 г. на Алданском нагорье (Южная Якутия)

Местоположение основного события (большой круг), остальные – афтершоки. В стереограмме – решение фокального механизма из каталога GCMT (<http://www.globalcmt...>).

Кинематика первого из них, по геолого-геофизическим сведениям, представляет комбинацию сдвиговых и сбросовых перемещений, а второго – соответствует сдвигу [Парфенов и др., 1985]. Скорее всего разрыв в очаге произошёл здесь по плоскости  $NP_2$ , ориентированной близдолготно. Об этом свидетельствует вытянутость афтершоковой области Гонамского землетрясения 2014 г. в северо-западном направлении, близком к простиранию Тыркандинского разлома. Сравнивая параметры механизма очага из каталога GCMТ с нашим решением для этого события, обнаруживается совпадение в ориентации поверхности разрыва  $NP_2$  и различие в положении нодальной плоскости  $NP_1$ , которая оказалась более пологой (Рис. 1 и 3). Это позволяет предположить, что Гонамский сдвиг, составляющий тектонический узел с Тыркандинским разломом, может представлять собой пологий надвиг с наклоном на север под углом в  $37^\circ$ .

### **Выводы**

Использование для землетрясений Южной Якутии методики расчета ТСМ по амплитудным спектрам поверхностных волн показало, что результаты вычислений хорошо согласуются с данными мировых сейсмологических агентств. Следовательно, с ее помощью можно улучшить качество оценок фокальных механизмов в тех случаях, когда их решения другими способами имеют неоднозначность, и значительно расширить информационную базу об очаговых параметрах региональных землетрясений средних магнитуд.

В заключение можно отметить, что полученные результаты в дальнейшем могут способствовать повышению надежности детальных исследований напряженно-деформированного состояния земной коры, выявлению особенностей сеймотектонических процессов, детализации морфо-кинематических характеристик активных разломов и построению более реалистичных геодинамических моделей для территории Южной Якутии.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 14-05-31173).*

### **Список литературы**

Букчин Б.Г. Об определении параметров очага землетрясения по записям поверхностных волн в случае неточного задания характеристик среды // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. – 1989. – № 9. – С. 34–41.

Горнштейн Д. К., Мокшанцев К. Б., Петров А. Ф. Разломы восточной части Сибирской платформы // Разломная тектоника Якутской АССР. – Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР. – 1976. – С. 10–63.

Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сеймотектоника Якутии – М.: ГЕОС, 2000. – 227 с.

Левшин А.Л., Яновская Т.Б., Ландер А.В., Букчин Б.Г. и др. Поверхностные сейсмические волны в горизонтально-неоднородной Земле. – М.: Наука, 1986. – 278 с.

Парфенов Л.М., Козьмин Б.М., Имаев В.С. и др. Геодинамика Олекмо-Становой сейсмической зоны. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1985. – 136 с.

Середкина А.И., Мельникова В.И. Тензор сейсмического момента землетрясений Прибайкалья по амплитудным спектрам поверхностных волн // Физика Земли. – 2014. – № 3. – С. 103–114. Doi: 10.7868/S0002333714030090

Шибаетов С.В., Петров А.Ф., Козьмин Б.М. и др. Чаруодинский рой землетрясений 2005 г. и его ощутимые землетрясения; Чаруодинское-I 10 ноября в 19<sup>h</sup>29<sup>m</sup> с  $K_p=15.7$ ,  $M_w=5.8$ ,  $I_0=8$  и Чаруодинское-II 11 декабря в 15<sup>h</sup>54<sup>m</sup> с  $K_p=14.8$ ,  $M_w=5.7$ ,  $I_0=7$  (Южная Якутия) // Землетрясения Северной Евразии. 2005 год. – Обнинск: ГС РАН, 2011. – С. 404 – 418.

Bassin, C., Laske, G., Masters, G. The current limits of resolution for surface wave tomography in North America // EOS Trans AGU. – 2000. – V. 81. – F897.

Dziewonski A.M., Anderson D.L. Preliminary Reference Earth Model // Phys. Earth Planet. Inter. – 1981. – 25. – P. 297–356.

Emmerson B., Jackson J., McKenzie D., Priestley K. Seismicity, structure and rheology of the lithosphere in the Lake Baikal region // Geophys. J. Int. – 2006. – 167. – P. 1233–1272.

<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>

Lasserre C., Bukchin B., Bernard P., Tapponier P., Gaudemer Y., Mostinsky A., Dailu R. Source parameters and tectonic origin of the 1996 June 1 Tianzhu ( $M_w=5.2$ ) and 1995 July 21 Yongen ( $M_w=5.6$ ) earthquakes near the Haiyuan fault (Gansu, China) // Geophys. J. Int. – 2001. – 144 (1). – P. 206–220.

Nataf H.-C., Ricard Y. 3SMAC: on a priori tomographic model of the upper mantle based on geophysical modeling // Phys. Earth Planet. Inter. – 1996. – 95. – P. 101–122.

Sloan R.A., Jackson J.A., McKenzie D., Priestley K. Earthquake depth distributions in Central Asia, and their relations with lithosphere thickness, shortening and extension // Geophys. J. Int. – 2011. – 185. – P. 1–29. Doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04882.x

УДК 550.31 + 550.34

## **ДИАГНОСТИКА МЕТАНЕСТАБИЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ СЕЙСМОАКТИВНОГО РАЗЛОМА ПО ДАННЫМ ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА**

**<sup>1,2</sup>Борняков С.А., <sup>1</sup>Мирошниченко А.И., <sup>1</sup>Салко Д.В.**

<sup>1</sup>*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, e-mail: TsoyIG@alrosa.ru*

<sup>2</sup>*Иркутский государственный университет, г. Иркутск, ул. Ленина, 25*

**Представлен новый подход к диагностике предсейсмогенного состояния сейсмоактивного разлома по результатам спектрального анализа данных деформационного мониторинга.**

**Ключевые** слова: сейсмоактивный разлом, метанестабильное состояние, деформационный мониторинг, спектральный анализ, синергетика.

## **DIAGNOSTICS OF METAINSTABLE STATE OF SEISMO-ACTIVE FAULT ACCORDING DEFORMATION MONITORING DATA**

**<sup>1,2</sup>Sergei A. Bornyakov, <sup>1</sup>Andrei I. Miroshnichenko, <sup>1</sup>Denis V. Salko**

<sup>1</sup>*Institute of the Earth's crust, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Lermontov st., 128, e-mail: TsoyIG@alrosa.ru*

<sup>2</sup>*Irkutsk State University, geological faculty, Irkutsk, Lenina, 25*

**New approach to diagnostics of seismically dangerous state of seismoactive fault is presented based on results of spectral analysis of deformation monitoring data.**

### **Введение**

Синергетическая интерпретация процесса подготовки землетрясения предполагает, что перед его реализацией при критическом уровне накопленных в очаговой области тектонических напряжений, близких к пределу прочности слагающих её пород, имеет место кратковременная самоорганизация эволюционирующего деформационного процесса, именуемая «самоорганизованной критичностью (СОК)» [6]. Известно, что признаками перехода эволюционирующей открытой системы в состояние самоорганизации является возникновение тесной взаимосвязи составляющих её элементов и их согласованное, кооперативное поведение, сопровождающееся развитием автоволнового режима функционирования [1]. В приложении к деформационным процессам экспериментально установлено, что по мере приближения деформируемого образца к критическому состоянию предразрушения возрастает амплитуда колебаний тестового параметра, а их

периоды модулируются и отвечают лог-периодической (log-periodic) последовательности [9]. Из этого следует, что с точки зрения синергетического концептуального подхода в качестве предвестников грядущего сейсмического события помимо высокого уровня напряжений, нужно принимать наличие кооперативных явлений и особенности колебаний во временных рядах деформаций. Количественная оценка напряжений в абсолютных значениях, также, как и её оперативность, весьма проблематичны для глубин, недоступных для инструментальных наблюдений. В лучшем случае, как постфактум, можно судить об относительной направленности их изменения по мере появления новой сейсмологической информации [2] и др.]. Кооперативные синергетические эффекты во временных рядах данных деформационного мониторинга могут диагностироваться специальными методами, адаптированными к анализу открытых систем [10 и др.]. Публикации, касающиеся исследований особой колебательной динамики деформационного процесса перед сейсмическим событием по данным мониторинговых инструментальных наблюдений, авторам не известны.

В настоящей статье на примере результатов спектрального анализа данных мониторинга деформаций ледового покрова озера Байкал и горных пород представлен новый подход к диагностике предсейсмогенного состояния литосферы в пределах очаговой области.

### **Фактический материал и метод его обработки**

Фактическим материалом служили данные мониторинга деформаций ледового покрова озера Байкал и горных пород. Мониторинг деформаций ледового покрова озера Байкал выполнялся в феврале-марте 2013 года в районе п. Листвянка в шести километрах от берега. В этот период повышение среднесуточных температур приводит к росту напряжений в ледовом покрове за счет объемного температурного расширения льда, что нередко сопровождается его сейсмогенным разрушением в виде ледовых ударов в пределах станových трещинах [3]. Измерения проводились инструментальным комплексом включающим, в себя прибор-регистратор [4] и датчики деформаций с базой  $4 \cdot 10^{-1}$  м, обладающие точностью  $10^{-5}$  м. Опрос датчиков велся с 1 секундной дискретностью. Для анализа использованы дневные выборки записей за период с 26 февраля по 5 марта. В рамках этого временного интервала зарегистрированы два ледовых удара 3 и 5 марта. Первый из них был слабым и локальным, второй сильным и масштабным. В результате его реализации произошло сейсмогенное вспарывание смерзшейся становой трещины по простиранию на расстоянии в несколько километров.

Мониторинг деформаций горных пород был выполнен с апреля по ноябрь 2008г в штольне, расположенной на территории сейсмостанции «Талая» БФ ГС СО РАН. Технические вопросы его проведения описаны в [10].

Уникальность использованных в работе данных заключается в том, что они получены в структурно-неоднородных средах со сходным реологическим поведением под нагрузкой, но с разными пространственными и временными масштабами протекающих в них деформационных процессов. В случае ледового покрова они охватывают десятки метров-первые километры и первые часы, а в случае литосферы, - десятки-первые сотни километров и первые месяцы. Несмотря на эти различия, процессы подготовки в них сейсмических событий подчиняются общим закономерностям, что позволяет выявленные для ледовых ударов прогнозные признаки использовать в качестве предвестников землетрясений [3].

Для обработки данных деформационного мониторинга применен спектральный анализ. Использована специализированная программа, созданная сотрудником лаборатории современной геодинамики ИЗК СО РАН Ф.Л. Зуевым. Программа написана на языке Perl/PDL и реализует алгоритм построения периодограммы Ломба-Скаргла, в том виде как он описан в [7].

### **Результаты**

На рисунке 1 отражены результаты спектрального анализа временных рядов деформаций ледового покрова в дневное время с 26 февраля по 5 марта 2013г. С 26 февраля по 1 марта среднесуточная температура воздуха держалась в пределах  $-10^{\circ}$ , а с 1 по 5 марта наблюдался её рост с небольшими вариациями вплоть до плюсовых значений (Рис. 1, врезка А).

Таким образом, после 1 марта ледовый покров начал испытывать температурное расширение с ростом в нем напряжений, уровень которых достиг критических значений 5 марта, что подтверждается реализацией в этот день сильного ледового удара. Эволюция напряженно-деформированного состояния ледового покрова в отмеченные дни нашла отражение в особенностях строения спектрограмм (Рис. 1). Первая из них, характеризующая деформационный процесс 1 марта имеет четыре преобладающих периода более 2000 секунд (2500, 3250, 4495 и 8775 сек) с близкими значениями параметра «периодограмма». 3 марта этот параметр для малых периодов колебаний уменьшается, а для больших (4800 и 7300 сек) остается на примерно прежнем уровне. Сами периоды, как видно из их сопоставления, изменились. Спектрограмма для 5 марта отличается от двух предыдущих. На ней выделяется пять новых значимых периодов колебаний (2495, 5250, 3700, 2995 и 2495 сек). При этом параметр «периодограмма» существенно возрастает,

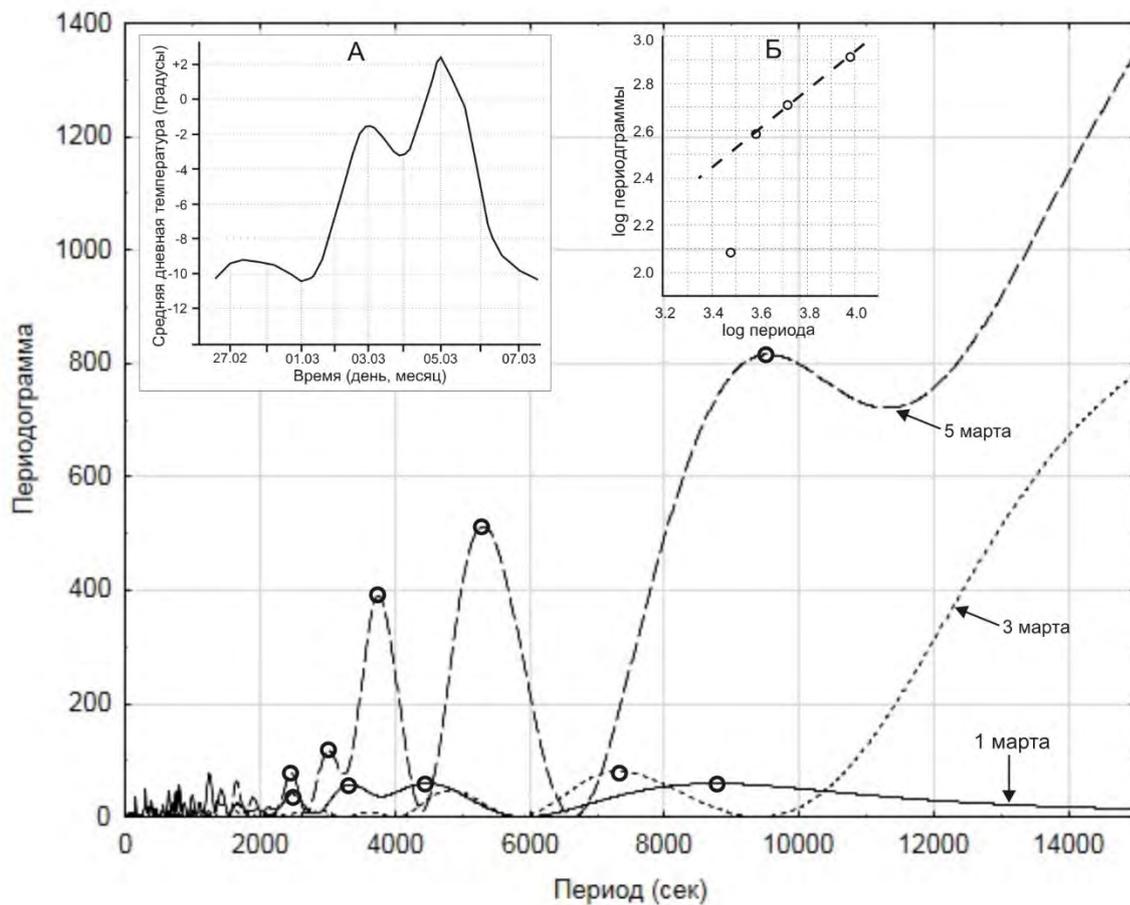


Рис. 1. Результат спектрального анализа данных мониторинга деформаций ледового покрова оз. Байкал

На врезках график вариаций средней дневной температуры воздуха в пункте мониторинга (А) и график значения выделенных периодов и их периодограмм в логарифмическом масштабе (Б).

колебания все более меньших периодов становятся значимыми в деформационном процессе, а отношения последних трех выделенных максимальных периодов удовлетворяют лог-периодической последовательности (Рис. 1, врезка Б). Поскольку «периодограмма» опосредованно отражает интенсивность колебательного процесса, то есть амплитуду колебаний, то можно констатировать, что последняя, по мере роста напряжений в ледовом покрове, вплоть до его перехода в предсейсмогенное состояние, увеличивается на всех выделенных периодах в несколько раз. Аналогичные амплитудные вариации наблюдались при сходе ледников [5 и др.]

Ранее полученные результаты обработки данных мониторинга деформаций горных пород в штольне с/с «Галая» 2008 г. показали, что формирование состояния СОК деформационного процесса началось за полторы-две недели до землетрясения и вступило в заключительную фазу за несколько дней до него [10]. Определим последний временной интервал как заключительный этап деформационной эволюции очаговой области, а состояние литосферы в его пределах как предсейсмогенное. С учетом этого, весь временной

ряд данных был разбит на месячные интервалы, кроме пред и постсейсмогенных, составляющих  $n$  дней интервалов: 10 мая - 09 июня, 10 июня – 09 июля, 10 июля – 09 августа, 10 августа – 26 августа (предсейсмогенный период), 28 августа – 09 сентября, 10 сентября - 09 октября. Для каждого из них был выполнен спектральный анализ (Рис. 2). Из сопоставления полученных спектрограмм видно, что структура и интенсивность колебательного процесса меняется во времени, что в основном наиболее отчетливо прослеживается на больших периодах в пределах их значений от  $2E5$  до  $8E5$ . На первой спектрограмме здесь насчитывается девять выделенных периодов с экспоненциальным ростом параметра «периодограмма» по мере их увеличения, что указывает на упорядоченную, фрактальную структуру спектра (Рис. 2-А). На второй спектрограмме значения выделенных периодов меняются, их количество сокращается до шести, а структура спектра хаотизируется за счет неравномерного роста параметра «периодограмма» у разных периодов (Рис. 2 – Б). В следующий временной интервал на фоне очередного снижения этого параметра вновь изменяется структура спектрограммы с проявлением упорядоченности. При этом, количество и значения выделенных периодов колебаний сопоставимы с таковыми на первой спектрограмме (Рис.2 – А, В). В четвертый, предсейсмогенный интервал, продолжается начавшееся в предыдущем случае снижение интенсивности колебательного процесса, сокращается количество выделенных периодов с выстраиванием их значений в «лог-периодическую» последовательность (Рис. 2 – Г, врезка на рисунке).

После реализации 27 августа Култукского землетрясения деформационный режим существенно изменился. Спектрограмма для следующего за землетрясением расчетного временного интервала показывает существенную хаотизацию деформационного процесса на фоне возросших значений параметра «периодограмма». Ведущая роль здесь принадлежит колебаниям с малыми и средними периодами в интервале их значениями от 0 до  $4E5$  секунд, при отсутствии отчетливо выраженных больше-периодных колебаний в интервале от  $4E5$  до  $1E6$  секунд (Рис. 2 – Д). И наконец, в последний расчетный временной интервал проявляется тенденция возврата деформационного процесса к исходному режиму и его структуризации с проявлением 9 преобладающих периодов, о чем свидетельствует качественное сходство спектрограмм А и Е рисунка 2. Завершая обзор результатов, отметим закономерное изменение во времени суточного периода (СП) (Рис. 2). По мере приближения к моменту реализации землетрясения параметр «периодограмма» для этого периода снижается с 1200 единиц до 400 единиц (Рис.2 А, Б, В, Г), оставаясь на этом уровне в течение двух недель после него (Рис. 2 – Д), и затем начинает повышаться (Рис. 2 – Е).

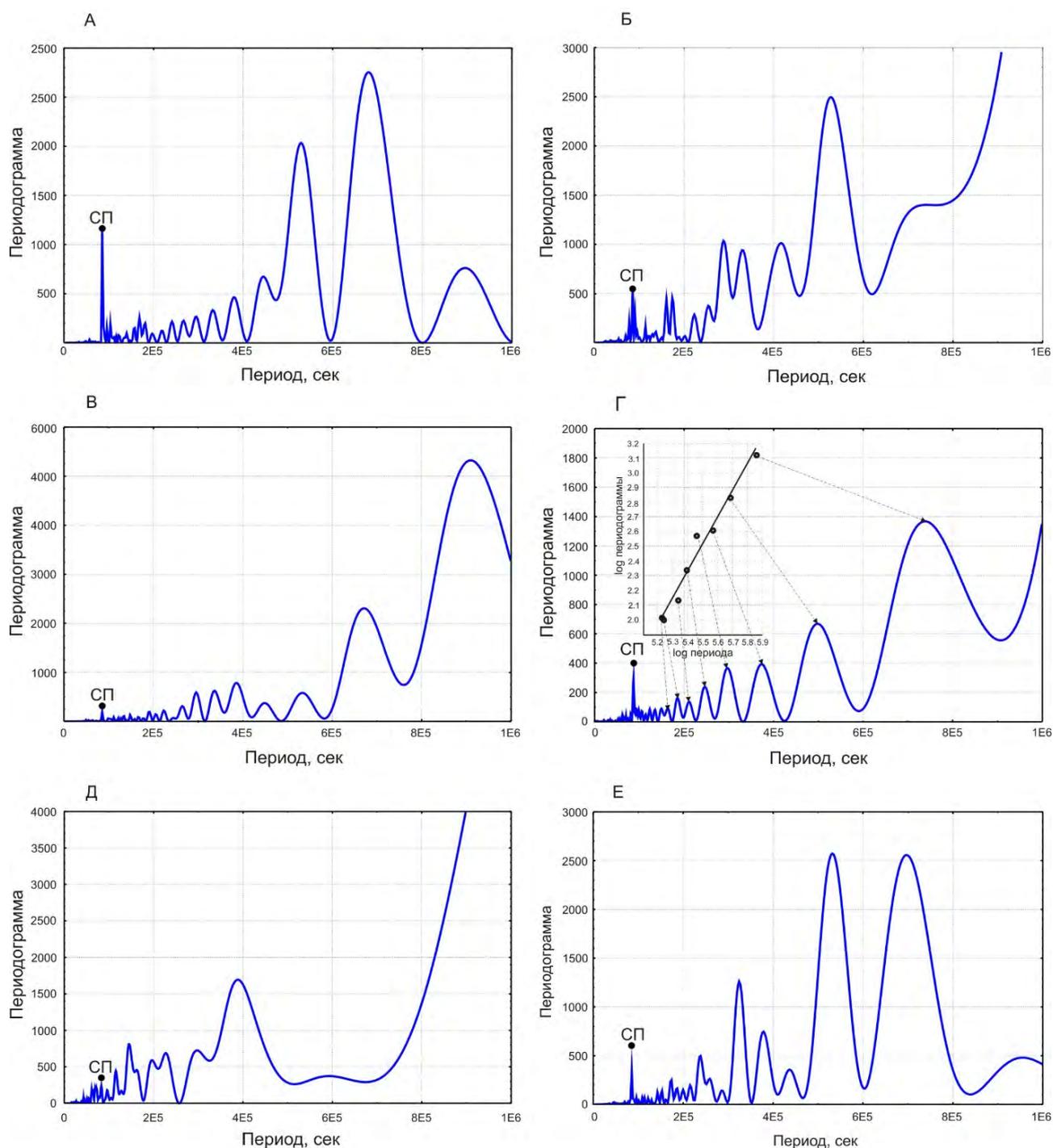


Рис. 2. Результат спектрального анализа данных мониторинга деформаций горных пород в штольне сейсмостанции «Галая» в разные временные интервалы

А – с 10 мая по 09 июня, Б - с 10 июня по 09 июля, В – с 10 июля по 09 августа, Г – с 10 августа по 26 августа, Д – с 27 августа – 09 сентября, Е – с 10 сентября по 09 октября. СП – суточный период.

### Обсуждение результатов

Опираясь на синергетическую концептуальную основу, рассмотрим полученные результаты с позиции хорошо известной модели прерывистого скольжения «stick-slip». Лабораторные эксперименты по её воспроизведению показали, что нагруженная система из двух блоков непосредственно перед реализацией импульсного смещения одного из них

относительно другого переходит в метастабильное состояние с автоволновым режимом колебаний действующей нагрузки [5]. Позднее было показано, что метастабильное состояние не сразу трансформируется в импульсную динамическую подвижку, а отделено от неё кратковременным интервалом с переходным «метанестабильным» состоянием, подразделяющимся в свою очередь на стадии ранней и поздней метанестабильности [8]. В первую стадию стартует и развивается в квазикрипповом стационарном режиме процесс относительного смещения блоков с медленной релаксацией накопленных на межблоковом контакте напряжений. Во вторую стадию «ускоренного синергизма» скорость смещения существенно возрастает и впоследствии, через процесс самоорганизации и лавинообразного объединения многочисленных активизированных сегментов межблокового контакта, переходит в динамическую импульсную подвижку. Из этих экспериментально установленных закономерностей следует, что в природной ситуации ранняя и поздняя метанестабильные стадии сейсмогенной активизации разлома могут диагностироваться по скорости снижения напряжений в очаговой области и наличию признаков самоорганизации деформационного процесса.

Рассмотрим с этих позиций процесс подготовки Култукского землетрясения 2008 г. Спектральный анализ данных деформационного мониторинга ледового покрова показал, что параметр «периодограмма» может приниматься за относительный показатель уровня накопленных в нём напряжений, а лог-периодическая последовательность выделенных периодов является признаком наличия кооперативных явлений в деформационном процессе (Рис. 1). Анализируя с этих позиций результаты спектрального анализа данных мониторинга деформаций горных пород до и после Култукского землетрясения можно полагать, что в первые два расчетных временных интервала напряжения в его очаговой области достигли критических значений, и она перешла в метастабильное состояние (Рис. 2 – А, Б). Следующие два интервала по аналогии с [8], могут интерпретироваться как стадии ранней и поздней метанестабильности (Рис. 2 - В, Г). В первую из них напряжения в очаговой области начинают снижаться и происходит направленная подстройка периодов колебаний (Рис. 3 – В). Во вторую стадию спад напряжений продолжается и проявляются признаки самоорганизации деформационного процесса, что подтверждается дальнейшим уменьшением значений параметра «спектрограмма» и наличием упорядоченной структуры спектрограммы с лог-периодической последовательностью выделенных периодов (Рис. 2 – Г). После землетрясения деформационный процесс хаотизируется, на фоне постепенного увеличения напряжений (Рис. 2 – Д, Е). Логично было ожидать, что напряжения должны были резко снизиться за счет их сейсмогенной разрядки, однако из полученных результатов этого не следует. Вероятным объяснением может служить то обстоятельство, что при

землетрясении в энергию сейсмических волн переходит лишь небольшой процент от общего уровня накопленных на сейсмогенном разрыве напряжений, а остальная их часть перераспределяется на соседние с очаговой областью разрывы.

### **Выводы**

С учетом всего выше изложенного можно констатировать, что в целом наблюдается хорошая согласованность результатов спектрального анализа данных деформационного мониторинга с модельной стадийностью подготовки импульсного смещения, предложенного в [8]. Это позволяет считать использованный подход весьма перспективным для диагностики перехода участков литосферы с потенциально сейсмоопасными разломами в предсейсмогенное состояние.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (15-55-53023-ГФЕН-а).*

### **Список литературы**

1. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика: от тепловых двигателей до диссипативных структур. - М., Мир. 2002, 460с.
2. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов // Академкнига, 2007. - 406 с.
3. Ружич В.В., Псахье С.Г., Черных Е.Н., Борняков С.А., Гранин Н.Г. Деформации и сейсмические явления в ледяном покрове озера Байкал // Геология и геофизика. 2009. - Т. 50. - № 3. - С. 289-299.
4. Салко Д.В., Борняков С.А. Автоматизированная система для мониторинга геофизических параметров на геодинамических полигонах // Приборы. 2014. - №6. -С.24-28.
5. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники // М.: Наука, 2003. - 268с.
6. Bak, P., Tang, C. Earthquakes as a self-organized critical phenomenon // Journal of Geophysical Research. 1989. - 94 (B11). - p. 15,635-15,637.
7. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/20004-lomb--lomb-scargle--periodogram>
8. Ma J. Accelerated synergism along a fault: A possible indicator for an impending major earthquake /Guo Y., Sherman S.I. // Geodynamics & Tectonophysics. 2014. - V.5, - No.2 - С.87–399.
9. Prolong A. On predictability of ice avalanche /Birrer C., Stahel w.a., Funk M. // Nonlin. process in Geophysics, - 2005. - 12, - P.849-861.

10. Vstovsky G.V. First experiences of seismodeformation monitoring of Baikal rift zone (by the example of South-Baikal earthquake of August 27, 2008) /Bornyakov S.A. // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. - 2010. No.10. - P. 667-672.

**НОВЫЕ ДАННЫЕ О ЗАТУХАНИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В ЛИТОСФЕРЕ И  
ВЕРХНЕЙ МАНТИИ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ФЛАНГА БАЙКАЛЬСКОЙ  
РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ**

<sup>1</sup>Добрынина А.А., <sup>1,2</sup>Саньков В.А., <sup>3</sup>Чечельницкий В.В.

<sup>1</sup>*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, e-mail: dobrynina@crust.irk.ru*

<sup>2</sup>*Иркутский государственный университет, геологический факультет, г. Иркутск, ул. Ленина, 25*

<sup>3</sup>*Байкальский филиал Геофизической службы СО РАН, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128*

Представлены результаты исследований затухания сейсмических волн в литосфере и верхней мантии северо-восточного фланга Байкальской рифтовой системы методами огибающей сейсмической коды и скользящего окна. В подкоровой части литосферы выделяется слой с повышенным затуханием сейсмических волн небольшой мощности, связанный, по-видимому, с повышенной неоднородностью (раздробленности) и присутствием флюидов. Глубина залегания подошвы литосферы изменяется от 100-120 км на западе территории в пределах Байкальской складчатой области до 120-140 км – на востоке в пределах Сибирской платформы. Сделано заключение о наличии двух астеносферы астеносферных слоев. Выявленные особенности строения литосферы и верхней мантии предполагают возможность постепенной их модификации при участии процессов флюидизации и частичного плавления в условиях позднекайнозойского растяжения под воздействием удаленных источников тектогенеза.

Ключевые слова: затухание сейсмических волн, добротность, Байкальская рифтовая система, литосфера, астеносфера.

**NEW DATA ABOUT SEISMIC WAVE ATTENUATION IN THE LITHOSPHERE AND  
UPPER MANTLE OF NORTHEASTERN FLANC OF BAIKAL RIFT SYSTEM**

<sup>1</sup>Anna A. Dobrynina, <sup>1,2</sup>Vladimir A. Sankov, <sup>3</sup>Vladimir V. Chechelnitkii

<sup>1</sup>*Institute of the Earth's crust, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Lermontov st., 128, e-mail: dobrynina@crust.irk.ru*

<sup>2</sup>*Irkutsk State University, geological faculty, Irkutsk, Lenina, 25, e-mail: sankov@crust.irk.ru*

<sup>3</sup>*Baikal regional seismological center, Geophysical survey, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Lermontov st., 128, e-mail: chechel@crust.irk.ru*

The results of studies of seismic wave attenuation in the lithosphere and upper mantle of the northeastern flank of the Baikal rift system obtained using a techniques of envelope seismic coda and the sliding window are presented. In subcrustal lithosphere there is a layer with high attenuation of seismic waves connected, apparently,

with high heterogeneity (fragmentation) and the presence of fluids. The depth of the base of the lithosphere varies from 100-120 km to the west of the territory within the Baikal folded area to 120-140 km - to the east within the Siberian platform. It is concluded that there are two layers of the asthenosphere. The revealed features of the structure of the lithosphere and upper mantle suggest the possibility of a gradual modification process with the participation of fluidization and partial melting in a late Cenozoic extension under the influence of distant sources orogeny.

Keywords: attenuation of seismic waves, the quality factor, the Baikal rift system, the lithosphere, the asthenosphere.

К настоящему времени получено достаточное количество данных о том, что под Байкальской рифтовой системой (БРС) не существует единой крупной мантийной аномалии. Это не позволяет считать, что гипотеза активного рифтинга может исчерпывающе объяснить формирование рифтовых структур. В связи с этим возможно предположить, что растяжение, возникающее под воздействием не локальных удаленных источников тектонических сил, инициирует постепенные изменения свойств литосферы по всему разрезу, выражающиеся в появлении локальных аномалий, выраженных, в частности, в глубинных вариациях затухания и скоростей сейсмических волн.

В данной работе нами исследуются глубинные вариации затухания сейсмических кода-волн в литосфере и верхней мантии северо-восточного фланга БРС. Ранее авторами по кода-волнам региональных землетрясений была рассчитана сейсмическая добротность литосферы для всей территории северо-восточного фланга БРС и проведены сопоставления полученных результатов с возрастом консолидации коры, степенью сейсмической активности и нарушенности среды разломами [1]. В работах немногочисленных предшественников исследования добротности ( $Q$ ) земной коры и верхней мантии БРС и, в частности, ее северо-восточного фланга, по большей части носили локальный характер. Можно упомянуть лишь несколько публикаций на эту тему [2-4]. В работе Ю.Ф. Копничева [5] исследованы закономерности затухания в литосфере юго-западного фланга БРС, а также приведены оценки поглощения по данным удаленных станций для всего региона. В целом, закономерности глубинных вариаций сейсмической добротности для большей части региона до сих пор исследованы недостаточно.

Глубинные разрезы сейсмической добротности  $Q_c$  были получены по кода-волнам умеренной силы и сильных локальных землетрясений (20 событий с магнитудой  $M \geq 4$ , зарегистрированных на эпицентральных расстояниях до 200 км). Для обработки данных использовались два метода: 1) метод огибающей сейсмической коды [2, 5] и 2) метод скользящего окна (длина окна выбиралась равной 10-15 секундам, шаг 5 секунд). Глубина проникновения кода-волн рассчитывалась согласно стандартному подходу, исходя из простых

## ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

геометрических соображений. Для анализа глубинных вариаций затухания использовались значения добротности на частоте 1 Гц, так как на этих частотах наилучшим образом проявляется неоднородность поля затухания [5].

В результате были получены одномерные глубинные разрезы сейсмической добротности  $Q_c$  для одиннадцати локальных областей рассматриваемого региона (Рис. 1, 2). Диапазон глубин составляет порядка 260 км (от 44 до 306 км) и включает в себя литосферную мантию и астеносферу (Рис. 1, 2). Глубинные разрезы  $Q_c$  показывают достаточно сильные вариации добротности (от 50 до 170), при этом отмечается неравномерное изменение величины  $Q_c$  с глубиной – наблюдается чередование слоев с повышенным и пониженным затуханием (Рис. 1). Ранее авторами отмечена приуроченность изменения характеристик затухания к скоростным границам в литосфере [4, 5].

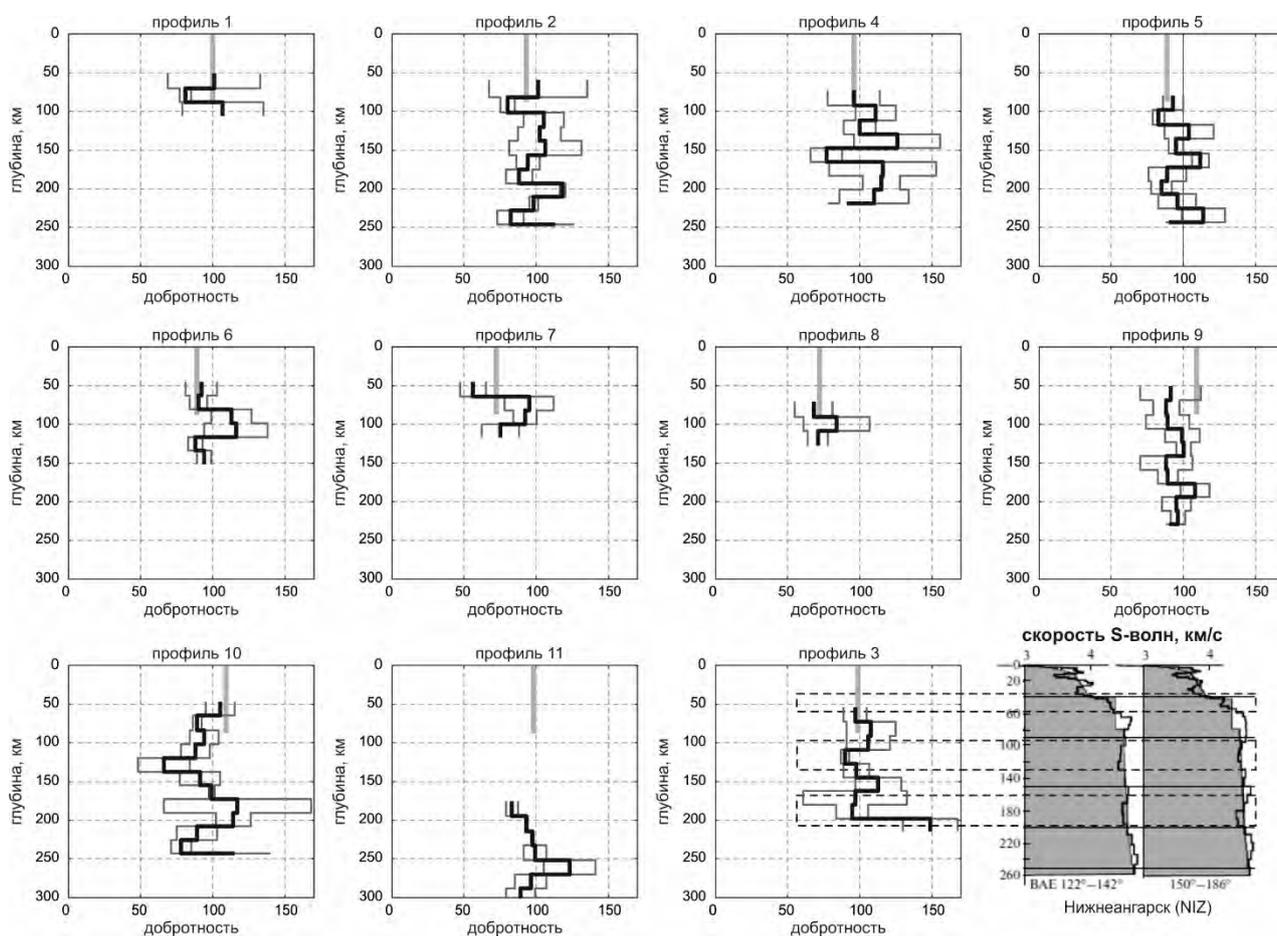


Рис. 1. Локальные глубинные разрезы сейсмической добротности  $Q_c$

Среднеквадратичное отклонение на профилях показано тонкими серыми линиями; серым вертикальным столбиком показано среднее для каждого района значение добротности литосферы до глубины 87 км по [4]. Справа внизу приведен для сравнения с глубинным разрезом добротности приведен разрез скоростей S-волн под станцией NIZ (Нижеангарск) [14] (справа, серым показана референц-модель, пунктирными линиями выделены области высокого затухания и низких скоростей S-волн).

Практически на всех профилях на глубине примерно 100 км выделяется тонкий слой (от 20 км) с повышенным затуханием (Рис. 1, 2), причем под разными станциями глубина залегания слоя и его толщина несколько меняются. Так, для станции Улюнхан (YLYR, пр. 1, 2), расположенной на северном замыкании Баргузинской впадины, этот слой расположен на глубинах от 70 до 90 км (пр.1) и от 90 до 100 км (пр.2). Под Кичерской впадиной (станция Нижнеангарск NIZ, пр.3) слой залегает на глубинах 110-140 км, а под Кичерско-Верхнеангарской междувпадинной перемычкой (станция Кумора КМО, пр. 5) он несколько утоняется и отмечен в интервале глубин 100-120 км. Под Верхнеангарской впадиной (станция Уоян УОА, пр.6) слой повышенного затухания начинается с глубины 115 км, в то время, как под Верхнеангарско-Муйской перемычкой (станция Северомуйск SVKR, пр. 7, 8) он поднимается до глубин 100-110 км. Чарская впадина и ее горное обрамление (станция Чара CRS, пр. 9, 10, 11) характеризуются самым заглубленным положением кровли слоя повышенного затухания – 120-140 км.

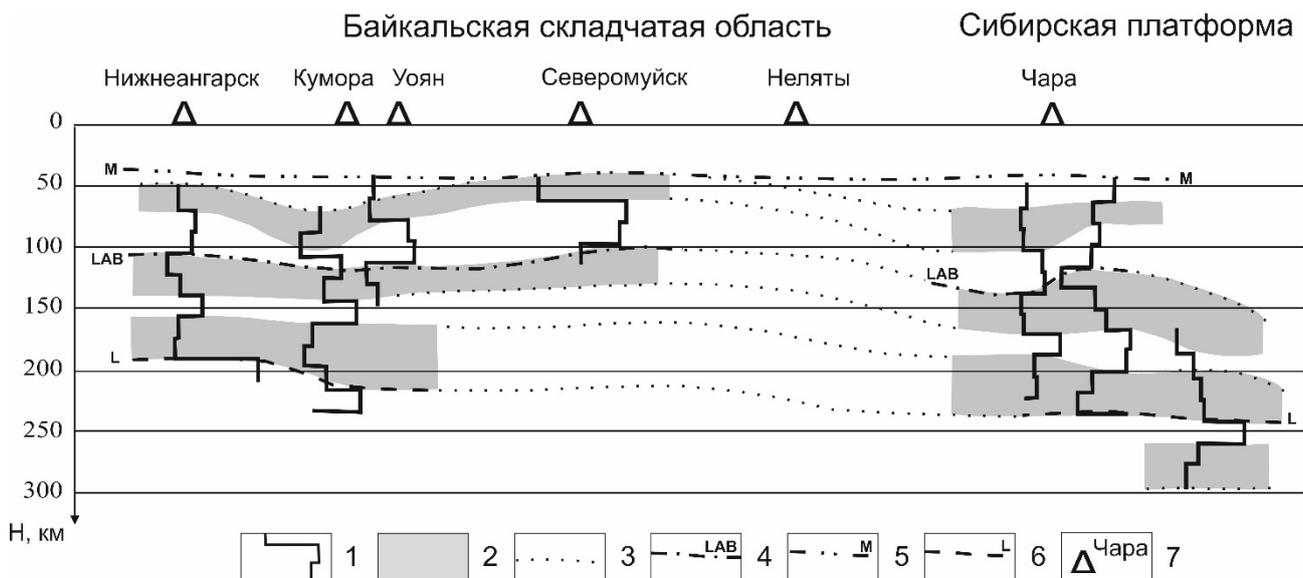


Рис. 2. Схематический разрез литосферы и верхней мантии северо-восточного фланга БРС, основанный на интерполяции данных о поглощении сейсмических кода-волн

Условные обозначения: 1 – кривые сейсмической добротности; 2 – области повышенного затухания сейсмических волн; 3 – предположительные границы области повышенного затухания; 4 – граница между литосферой и астеносферой (LAB); 5 – граница Мохоровичича (М); 6 – граница Лемана (L); 7 – сейсмические станции и их названия.

В нижней части разреза под несколькими станциями также выделяется достаточно мощный слой повышенного затухания сейсмических волн. В западной части территории он залегает на глубинах 160-200 км, а в восточной – на глубинах 180-240 км. Отметим, что повышенное затухание сейсмических волн характерно и для верхней части разреза (глубины менее 100 км). Так, по данным измерений на профилях 7 и 8 (станция Северомуйск SVKR),

## *ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА*

литосфера Верхнеангарско-Муйской междувпадинной перемычки характеризуется наличием слоя с самыми низкими значениями сейсмической добротности ( $Q_c(\text{пр.7}) = 56$ ,  $Q_c(\text{пр.8}) = 68$ ), непосредственно под корой, на глубинах менее 75 км. Ранее высокое затухание сейсмических волн в этом районе отмечалось по результатам оценки эффективной добротности литосферы [4] и связывалось с высокой степенью неоднородности среды. Профили 9 и 10 (станция Чара CRS), характеризующие литосферу южной части Чарской впадины и севера Удоканского поднятия, также указывают на наличие слоев с повышенным затуханием в пределах глубин 60-100 км.

Глубинное строение литосферы и верхней мантии исследуемого региона рассматривалось в работах [6-9]. Анализ скоростных аномалий продольных волн, полученных по результатам телесеismicкой 2D-томографии вдоль простирания БРС [8], показал, что под многими структурами рифтовой системы на глубине 90-110 км прослеживается граница между отрицательными и положительными аномалиями скоростей сейсмических волн. То же наблюдается по нашим данным о глубине положения слоя повышенного затухания (см. Рис. 2). При этом под Чарской впадиной и ее горным обрамлением кровля этого слоя погружается до глубины от 120 до 140 км, что согласуется с увеличением мощности литосферы при переходе от складчатой области к Сибирской платформе. По данным ГСЗ выявлено двухслойное строение области низкоскоростной мантии [6]. Подкорковый аномальный слой толщиной 20-50 км отделен от более глубоких горизонтов верхней мантии с близкими скоростными характеристиками (7.6-7.8 км/с) слоем с нормальными для этих глубин скоростями продольных волн (8.0-8.1 км/с). Контраст добротности  $Q_c$  между этими слоями составляет от 15-20 до 30-50. По данным МТЗ [10] на территории исследуемого региона выявлен проводящий астеносферный слой на глубинах 80-120 км, которому соответствует слой пониженных скоростей сейсмических волн. Его формирование автором цитируемой работы объясняется частичным плавлением мантийных пород. В работе [5] приводятся сопоставимые с полученными нами данные о глубине подошвы литосферы по данным сейсмической томографии.

Сопоставление полученных разрезов  $Q_c$  с одномерными профилями скоростей S-волн [9] показывает, что изменения значений добротности приурочены к скоростным границам среды, причем для областей с повышенными скоростями сейсмических волн также характерны повышенные значения  $Q_c$  и наоборот (Рис. 1). Оба метода указывают на трехслойное строение астеносферы в регионе. Нижняя граница области пониженных скоростей и высокого затухания сейсмических волн в мантии (граница Лемана) находится на глубине 190-240 км. Слои с повышенным затуханием сейсмических волн в литосфере (глубины менее 100 км), фиксируемые в пределах Верхнеангарско-Муйской перемычки и в

## *ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА*

районе Чарской впадины могут иметь различное происхождение. В первом случае их формирование может быть связано с повышенной сейсмической активностью, раздробленностью и, вследствие этого, повышенной флюидонасыщенностью литосферы. Во втором случае нельзя исключить возможность появления на глубинах 70-90 км промежуточных магматических очагов – источников позднекайнозойских базальтов Удоканского вулканического поля и приуроченность к ним областей повышенного затухания сейсмических волн. Кроме того, наблюдаемое под Удоканом утонение литосферы также может фиксировать положение области плавления в верхней мантии.

Таким образом, нами получена многослойная модель сейсмической добротности литосферы и верхней мантии северо-восточного фланга БРС с чередованием слоев с повышенным и пониженным затуханием сейсмических волн (Рис. 1). Слоям с повышенным затуханием в нижней части разреза соответствует астеносфера, залегающая в регионе на глубинах от 90 до 150 км. Кроме того, на глубинах 180-240 км выделен еще один слой с повышенным затуханием, который может быть также интерпретирован, как часть астеносферы. Повышенное затухание волн в этих слоях связано, скорее всего, с наличием неоднородностей в виде горизонтальных границ и частичным плавлением вещества мантии. Наличие слоев с повышенным затуханием в верхней части разреза может быть связано с повышенной сейсмической активностью, тектонической раздробленностью и флюидонасыщенностью литосферы, а также с проявлением магматических очагов в литосфере в районе Удоканского вулканического поля.

Предложенная ранее Н.А. Логачевым модель формирования Байкальского рифта за счет поднятия к подошве литосферы и растекания единого тела аномальной мантии предполагает появление на всех разрезах мощного слоя с повышенным затуханием под основанием литосферы при ее утонении. По нашим данным, а также по данным [8, 9], под литосферой северо-восточного фланга БРС такого единого тела не выделяется. Литосферная и астеносферная мантия имеет слоистое строение, что препятствует проявлению конвекции. Полученная многослойная модель сейсмической добротности литосферы и верхней мантии северо-восточного фланга БРС вместе с аналогичными результатами для юго-западного фланга [9], могут являться свидетельствами пассивного механизма формирования рифтовой системы.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-45-04157), программа ОНЗ РАН № 7.7 и гранта Президента РФ (проект № МК 1171.2014.5).*

**Список литературы**

1. Dobrynina A.A. Physics of the Earth and Planets Interior, 2011. V. 188: P. 121-126, doi:10.1016/j.pepi.2011.05.008.
2. Раутиан Т. Г. и др. Экспериментальные исследования сейсмической коды. М.: Наука, 1981. 144 с.
3. Дергачев А. А. Геология и геофизика // 1982. №6. С. 94-101.
4. Кочетков В. М. и др. Детальные сейсмологические исследования в Северо-Муйском районе // Геология и сейсмичность зоны БАМ. Сейсмичность / Ред. С.Л. Соловьев. Новосибирск: Наука, 1985. С. 123–180.
5. Копничев Ю.Ф. // Докл. АН, 1992. Т. 325(5). С. 944-948.
6. Детальные сейсмические исследования литосферы на Р- и S-волнах / С.В. Крылов, Б.П. Мишенькин, Мишенькина З.Р. и др. -Новосибирск: Наука, 1993. - 199 с.
7. Поспеев А.В. Электропроводность земной коры и мантии западной части Байкало-Амурского региона // Астеносфера по комплексу геофизических методов. – Киев: Наукова думка, 1988. С. 34-44.
8. Мордвинова В.В. Строение земной коры и верхней мантии Центральной Азии по данным телесеизмических объемных волн. Автореф. дисс. на соискание степени док. геол.-мин. наук. Иркутск, Институт земной коры СО РАН, 2009. 35 с.
9. Ананьин Л.В., Мордвинова В.В., Гоць М.Ф. и др. // Докл. РАН, 2009. Т. 428 (2). С. 211-214.
10. Priestley K., Debayle E., McKenzie D. et al. // J. Geophys. Res., 2006. V. 3, B10304. doi:10.1029/2005JB004082.

## **РАЗВИТИЕ ПЕТРОМАГНИТНОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ**

**<sup>1,2</sup>Константинов К.М., <sup>1</sup>Забелин А.В., <sup>2</sup>Константинов И.К., <sup>1</sup>Яковлев А.А., <sup>3</sup>Киргуев А.А.**

<sup>1</sup>*Научно-исследовательское геологоразведочное предприятие АК «АЛРОСА» (ОАО), 678174 Республика Саха (Якутия), Мирный, Чернышевское ш., 16, e-mail: KonstantinovKM@alrosa.ru*

<sup>2</sup>*Институт земной коры СО РАН, 667033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, e-mail: geologiaforever@mail.ru*

<sup>3</sup>*Амакинская ГРЭ АК «АЛРОСА» (ОАО), 678190, Айхал, ул. Первооткрывателей, 1, e-mail: KirguyevAA@alrosa.ru*

Решение вопросов физико-геологического моделирования, петромагнитного картирования, геодинамических реконструкций блоков земной коры, составляющих территорию Восточной Сибири, датирования геологических процессов и др. упирается в получение петро- и палеомагнитных характеристик горных пород верхней части разреза. В настоящее время с этой целью получен спектр плотностных и магнитных параметров по более чем 30000 ориентированным образцам, представляющий широкий возрастной интервал (поздний докембрий – мезозой) и типы пород (осадочные, вулканические, метаморфические образования). Оперативное использование этой информации для решения указанных задач невозможно без составления базы данных (БД). Петромагнитный блок интегрирован в БД Научно-исследовательского геологоразведочного предприятия АК «АЛРОСА» (ОАО) на уровне «проба», одного из блоков геологической привязки (геопривязка). Он позволяет извлекать цифровые данные в виде таблиц и проводить их обработку с помощью рекомендуемых компьютерных программ.

Ключевые слова: Восточная Сибирь, петромагнитная база данных, спектр магнитных параметров.

## **DEVELOPMENT OF THE PETROMAGNETIC DATABASE OF EASTERN SIBERIA**

**<sup>1,2</sup>Konstantinov K.M., <sup>1</sup>Zabelin A.Yu., <sup>2</sup>Konstantinov K.M., <sup>1</sup>Yakovlev A.A., <sup>3</sup>Kirkoev A.A.**

<sup>1</sup>*Geological Enterprise of Exploration, Diamond Mining Company ALROSA Co. Ltd, 678174, Mirny, 16 Chernischevskogo Str., e-mail: KonstantinovKM@alrosa.ru*

<sup>2</sup>*Institute of the Earth Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 128 Lermontova Str., e-mail: geologiaforever@mail.ru*

<sup>3</sup>*Amakinskaya expedition, Diamond Mining Company ALROSA Co. Ltd, 678190, Aikhal, 1 Pervootkrivateley Str., e-mail: KirguyevAA@alrosa.ru*

The solution of questions of fiziko-geological modeling, petromagnetic mapping, geodynamic reconstruction of the blocks of crust making the territory of Eastern Siberia, dating of geological processes, etc. rests against receiving petro-and paleomagnetic characteristics of rocks of the top part of a section. Now the wide range of density and magnetic parameters on more than to 30000 focused samples, the representing wide age

interval (the late Precambrian – the Mesozoic) and types of breeds (sedimentary, volcanic, metamorphic educations) is for this purpose received. Expeditious use of this information for the solution of the specified tasks is impossible without database compilation (DB). The Petromagnetic block is integrated into a DB of the Research prospecting enterprise Diamond Mining Company ALROSA Co. Ltd at the «Probe», one of blocks of a geological binding (geobinding). He allows to take figures in the form of tables and to carry out their processing by means of the computer programs.

Keywords: Eastern Siberia, petromagnetic database, range of magnetic parameters.

## **Введение**

Изучение магнетизма горных пород представляет огромный научный и практический интерес для решения широкого круга геолого-геофизических задач: физико-геологического моделирования, разработки Петромагнитной легенды и Схемы базитового магматизма Сибирской платформы, палеомагнитного датирования немых геологических процессов (магматизм, метаморфизм, тектоника), геодинамических реконструкций и т. п. [1]. За более чем 30-летний период палеомагнитных исследований горных пород Восточной Сибири (восточнее р. Енисей) собран уникальный материал по более чем 30000 ориентированным образцам из коренных обнажений Сибирской платформы и прилегающих к ней Саяно-Байкальской, Монголо-Охотской и Верхояно-Колымской складчатым областям [2-5]. Блок петромагнитных исследований включает следующий комплекс:

1. Петрофизический метод применяется для изучения современного магнитного состояния горных пород. В нашем случае проводились измерения магнитной восприимчивости  $\alpha$  и векторов  $I_n$ , из которых рассчитываются индуктивная  $I_i = \alpha H$  (где  $H$  – вектор напряженности геомагнитного поля района работ) и суммарная  $I = I_i + I_n$  намагниченности. В свою очередь, векторы намагниченности ( $I_n$ ,  $I_i$  или  $I$ ) определяются в пространстве тремя составляющими: скаляром (соответственно  $I_n$ ,  $I_i$  и  $I$ ), склонением ( $0 < D < 360^\circ$ ) и наклоном ( $-90^\circ < J < 90^\circ$ ). Отношение  $I_n/I_i$  характеризует коэффициент Кенигсбергера (фактор  $Q$ ). Результаты измерений формируются в виде таблиц (например, табл. 1).

2. Магнито-минералогический метод изучает текстурно-структурные особенности горных пород, а также компонентный химический и фазовый состав минералов-носителей намагниченности. Исследования включают измерения:

- а) анизотропии магнитной восприимчивости (AMS);
- б) гистерезисных параметров ферромагнитных минералов (индуктивная намагниченность насыщения -  $J_s$ , остаточная намагниченность насыщения -  $J_{rs}$ , коэрцитивная сила -  $H_c$  и сила, разрушающая остаточную намагниченность насыщения -  $H_{cr}$ ;
- в) точек Кюри  $\Theta$  ферромагнитных минералов по данным дифференциального

## ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

терромагнитного анализа индуктивной намагниченности  $J_i=f(T)$  и терромагнитограммам магнитной восприимчивости  $\alpha=f(T)$ .

3. Палеомагнитный метод устанавливает направления компонент векторов ЕОН горных пород на момент их формирования и/или «преобразования».

Таблица 1

Пример представления спектра магнитных параметров в «естественном залегании»

по силлу долеритов, перекрывающего трубку Сытыканская

Nobr	Dnc	Jnc	In	$\alpha$	Ii	Q	I	Jn1	Dn1
149.1	329	7	318.96	864.65	518.79	0.61	696.32	51	337
149.2	328	9	356.74	895.7	537.42	0.66	750.35	50	336
149.3	320	18	282.51	839.17	503.5	0.56	691.07	56	332
150.1	182	11	279.26	406.05	243.63	1.15	358.45	54	184
150.2	179	18	362.48	665.45	399.27	0.91	555.53	64	181
150.3	190	16	406.83	745.94	447.56	0.91	611.53	63	196
151.1	336	60	1518.67	1191.88	715.13	2.12	2212.9	65	340
151.2	330	57	1403.92	1170.38	702.23	2.00	2076.0	63	335
151.3	338	61	1773.68	1300.16	780.1	2.27	2535.15	66	341
152.1	319	33	506.03	1356.69	814.01	0.62	1223.89	60	331
152.2	309	34	433.5	1265.13	759.08	0.57	1103.62	62	325
152.3	294	37	465.1	1586.78	952.07	0.49	1312.28	66	318

Примечание: Nobr – номер образца, Dnc/Jnc – склонение/наклонение вектора естественной остаточной намагниченности In ( $10^{-3}$  А/м),  $\alpha$  – магнитная восприимчивость ( $10^{-5}$  СИ), Ii – индуктивная намагниченность, Q – коэффициент Кенигсберга (ед.), Jn1/Dn1 – наклонение/склонение вектора суммарной намагниченности I ( $10^{-3}$  А/м).

В настоящее время все эти данные хранятся в трех лабораториях: ИЗК СО РАН, НИГП и АмГРЭ АК «АЛРОСА». В результате острой необходимости оперативного доступа к информации по изученным объектам возникла идея создания единой петромагнитной базы данных (БД), которой так же могли бы пользоваться и другие заинтересованные в решении подобных задач исследователи. Таким образом, задача развития петромагнитной БД по структурно вещественным комплексам Восточной Сибири является одной из актуальных не только для Геологических подразделений АК «АЛРОСА», но и для НИИ и ПГО Сибирского и Дальневосточного федеральных округов. Для реализации этой идеи необходимо решить следующие основные и достаточно трудоемкие задачи:

1. Определить географическое местоположение объектов (координаты) и дать им краткое геологическое, литологическое/петрографическое и т. п. описание. Желательно фото, схема отбора образцов из обнажения, ссылки на первоисточники и пр.

2. Стандартизировать форматы файлов данных петромагнитных измерений для последующей их обработки по специализированным программам, пользующихся достаточно широкой популярностью в среде исследователей (Statistica, Enkin-96, Anisoft-42 и др.).

Результаты работ

Созданная в Научно-исследовательском геологоразведочном предприятии АК «АЛРОСА» БД представляет собой сеть, основными узлами которой являются таблицы. Способ прохода по таблицам называем сценарием. Пользователи, в зависимости от решения тех или иных геолого-геофизических задач, могут выбрать любой сценарий. С помощью сценариев пользователи собирают необходимый фактографический материал, полученный разными методами, и обрабатывают его с помощью рекомендуемых программ. Структура БД приведена на рисунке 1. Основными функциями разрабатываемой в БД и ее модулей является:

- сохранение накопленных за годы работы данных и пополнение новым фактографическим материалом;
- минимизировать человеческий фактор и не требовать от пользователя знаний языка SQL;
- обеспечение пользователю максимально быстрого доступа к информации, простоты и удобства ее обработки;
- взаимодействие методов между собой при обработке данных.

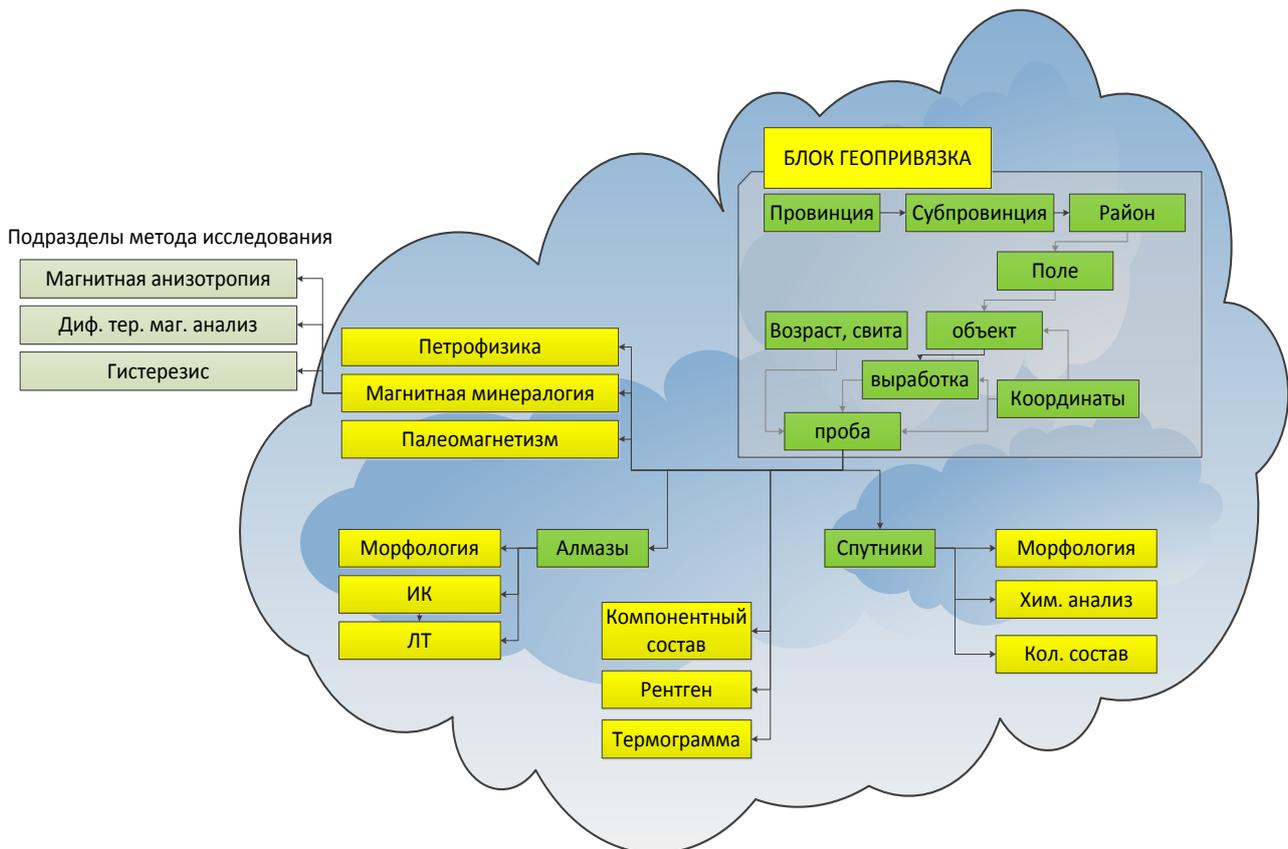


Рис. 1. Структура базы данных НИГП АК «АЛРОСА» (ОАО)

Все геологические данные по географическому расположению исследуемых проб содержатся в блоке «геопривязка» (Рис. 1). Пользователи могут выбирать данные по методам

## ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

(включая методы петрофизики, магнитной минералогии и палеомагнетизма) относительно блока геопривязки, возраста (стратиграфия, изотопия), координат объектов, горных выработок (карьеров, скважин), типа пород и др. Петромагнитная БД интегрирована с другими потоками данных предприятия.

К настоящему времени выполнена целевая задача по составлению электронной Схемы петромагнитной изученности среднепалеозойских базитов центральной части Сибирской платформы (Рис. 2). На ее основе можно создать выборку по интересующим исследователя объектов – покровы базальтов, дайки долеритов и т. п.

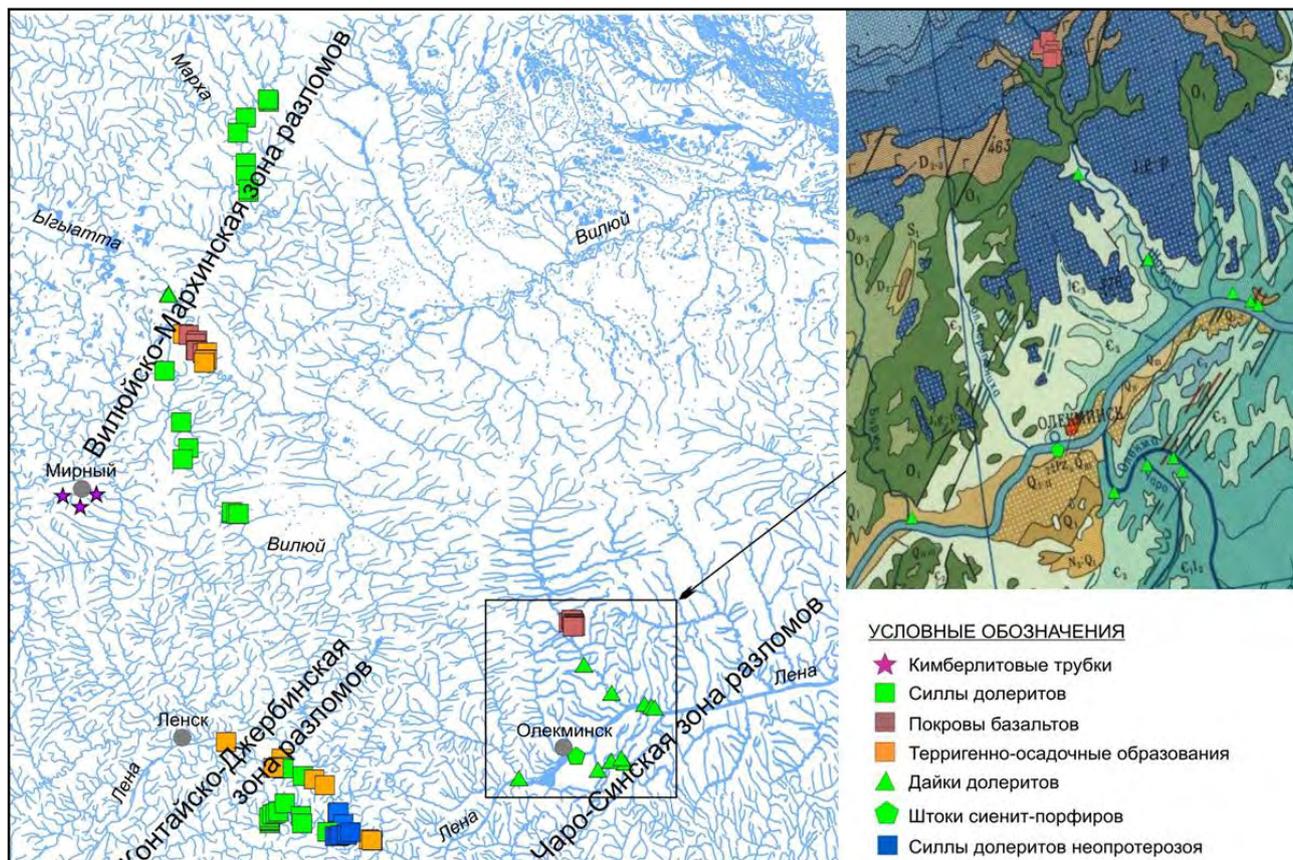


Рис. 2. Фрагмент электронной схемы петромагнитной изученности СВК зоны динамического влияния Вилуйского авлаогена

В начале обзора можно получить представления о распределении векторов намагниченности объектов, например, по долеритам р. Вилуй (Рис. 3). По данным первичных измерений (табл. 1), как правило, проводится статистическая обработка с целью получения дескриптивных значений магнитных параметров, установления корреляционных зависимостей, классификация, факторный анализ и т. п. (Рис. 4). Полученные данные, при наличии достаточно полного геологического содержания, целесообразно использовать в интерпретации данных магнитных съемок, петромагнитном картировании территорий развития пород траптовой формации и т. п.

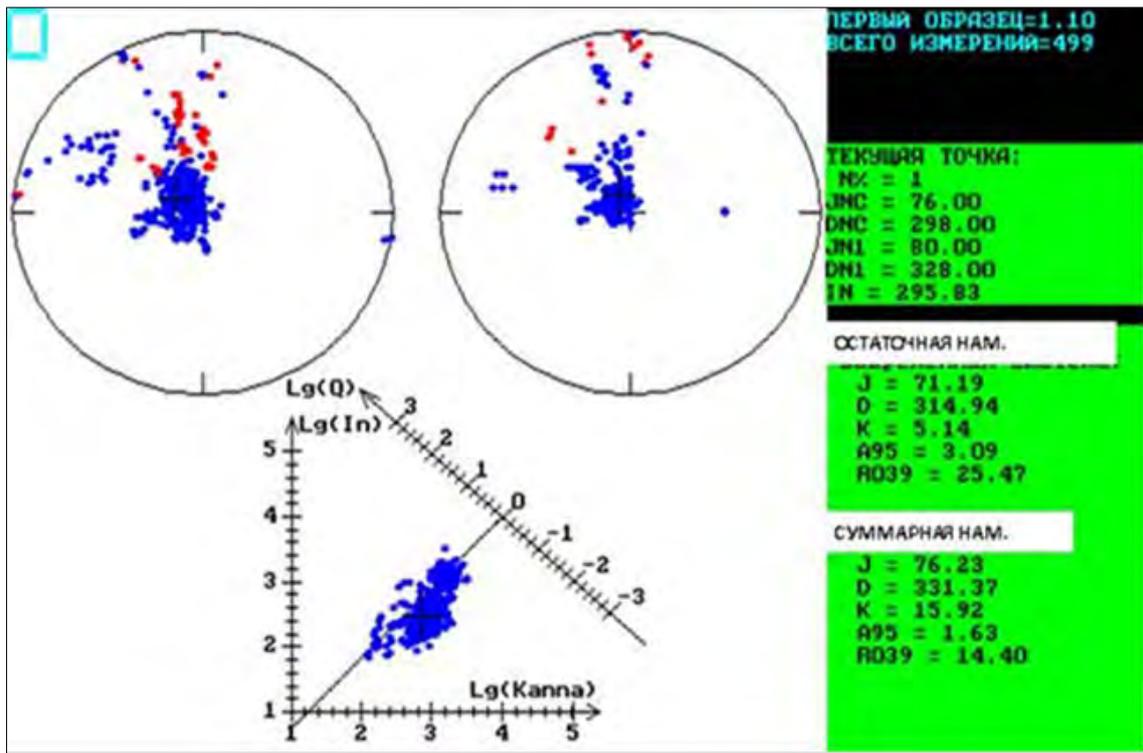


Рис. 3. Распределение магнитных параметров траппов на р. Виллюй в «естественном залегании»

Стереограммы распределения векторов намагниченности в географической системе координат: слева – естественная остаточная намагниченность  $I_n$ , справа – суммарная намагниченность  $I$ . Синие (красные) кружочки – прямая (обратная) полярность векторов намагниченности. Другие пояснения см. в табл. 1.

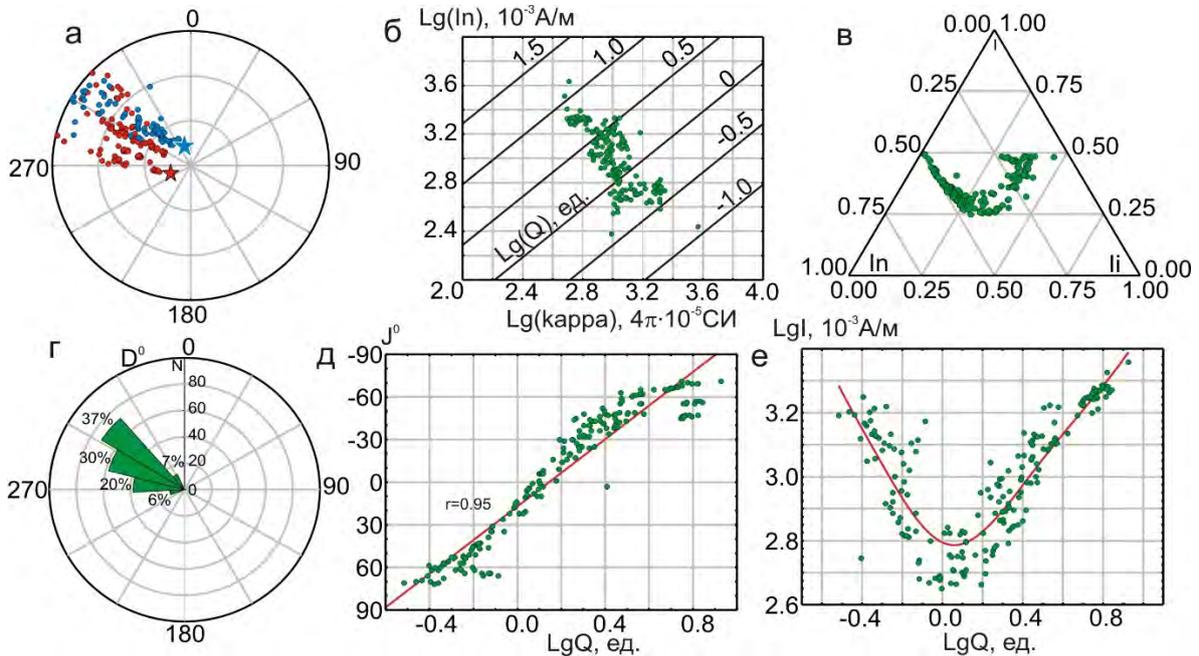


Рис. 4. Результаты статистической обработки магнитных параметров силла пермо-триасовых долеритов, перекрывающих кимберлитовую трубку Сытыканская (N=195)

а – стереограмма векторов суммарной намагниченности  $I$ ; синие (красные) кружочки – проекции векторов  $I$  на положительную (отрицательную) полусферу; звездочки – направления магнитного поля: красная – древнее  $H_p$ , на момент формирования траппов (обратная полярность), и синяя – современное  $H$ ; б – график зависимости  $I_n - \alpha - Q$ ; в – тернарный график  $I_n - I_i - I$ ; г – гистограмма склонений  $D$  векторов  $I$  (в полярной системе координат); д – график зависимости наклонений  $J$  векторов  $I$  от фактора  $Q$ ; е – график зависимости модуля  $I$  от фактора  $Q$ .

Например, по результатам физико-геологического моделирования проведена редукция (исключение) из полигеничного магнитного поля эффекта от перекрывающих месторождения алмазов (трубки Айхал, Сытыканская, Комсомольская и др.), пермотриасовых базитов (Рис. 5), рассчитанного на основе изучения их магнитных свойств. В итоге это привело к выделению аномалий «трубочного тапа» [4].

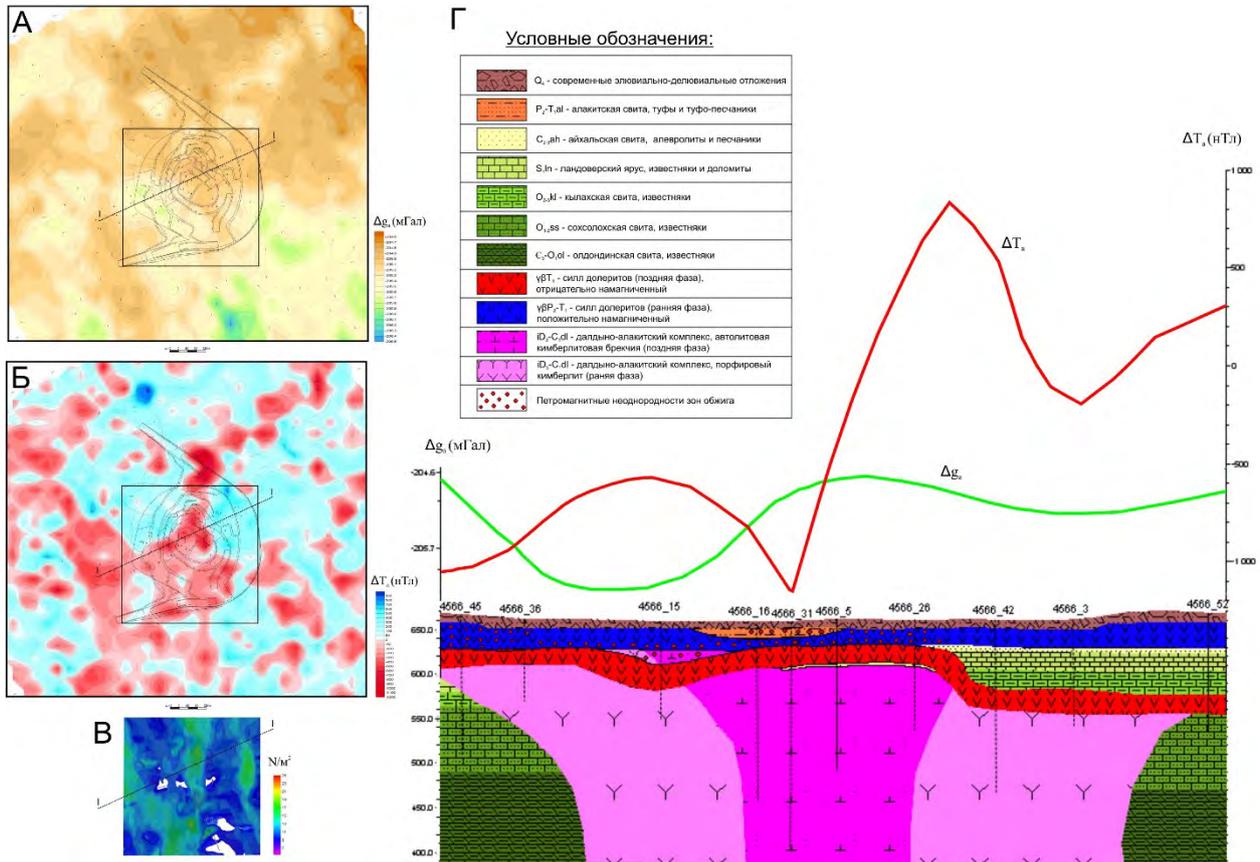


Рис. 5. Результаты комплексной интерпретации геолого-геофизических материалов на трубке Комсомольская

Карты аномальных полей: гравитационного (А) и магнитного (Б); В – распределение параметра плотности трещин (N) на 1 м<sup>2</sup> (показано распределение изолиний, начиная с величины 10.0 трещин/м<sup>2</sup>); Г – геолого-геофизический разрез по линии I-I.

Система наблюдений по изучению анизотропии магнитной восприимчивости вмещающих кимберлитовые трубки пород в комплексе с тектонофизическими данными может так же пролить свет на ряд физико-геологических процессов, протекающие без видимых химических, минералогических и т. п. изменений. Например, к таким «слепым» процессам могут относиться эпигенетические изменения пород околотрубочного пространства, образующиеся в результате внедрения кимберлитов. В результате первичная (осадочная) магнитная текстура вмещающих пород нарушается, при этом их химический, минералогический состав остается прежним.

Исследования гистерезисных параметров и точек Кюри ферромагнитных минералов-спутников алмаза позволяют моделировать термодинамические условия внедрения кимберлитовых трубок и анализировать причины присутствия этого полезного ископаемого или его отсутствие.

Особую роль в разработке гипотез геодинамического развития территории Восточной Сибири играют палеомагнитные данные. В настоящее время имеются мировые Палеомагнитные базы данных, составленные разными авторами. Но как правило они не позволяют исследователю самому проанализировать первичный материал, в котором может содержаться и некоторая важная, но не до оцененная, на данном этапе исследований, информация.

Таким образом, развитие петромагнитной БД по Восточной Сибири очень важная, но весьма трудная задача. Для ее скорой и успешной реализации необходимы так же усилия и других лабораторий, занимающихся изучением этой обширной территории.

### **Список литературы**

1. Храмов А.Н., Гончаров Г.И. и др. Палеомагнитология. - Л.: Недра, 1982. - 312 с.
2. Житков А.Н. Палеомагнитно-металлогенические исследования золотого оруденения центральной части Бодайбинского района: дис.... канд. геол.-мин. наук. - Иркутск, 1984. - 26 с.
3. Константинов К.М. Динамическая физико-геологическая модель Байкальской складчатой области по палеомагнитным данным: дис.... канд. геол.-мин. наук. - Иркутск, ВСНИИГГИМС. 1998. - 150 с.
4. Константинов К.М. Магнетизм кимберлитов и траппов зоны сочленения Вилуйской и Тунгусской синеклиз Сибирской платформы: дис.... докт. геол.-мин. наук. - Иркутск, Иркутский госуниверситет. 2014. - 368 с.
5. Кравчинский В.А. Палеомагнетизм горных пород Монголо-Охотского складчатого пояса: дис.... канд. геол.-мин. наук. - Иркутск, ИрГТУ. 1995. - 28 с.

УДК 550.34 (571. 61/62)

**СЕЙСМОЛИНЕАМЕНТЫ ВОСТОЧНОГО ПРИАМУРЬЯ ПО АНАЛИЗУ  
СЕЙСМИЧНОСТИ В 1968-2009 ГГ.**

**Меркулова Т.В.**

*Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65, e- mail:  
merculova@itig.as.khb.ru*

В работе исследована упорядоченность очагов землетрясений за период 1968-2009гг. Выполненный анализ сейсмолинеаментов за временные интервалы 5-7 лет показал, что большинство сейсмолинеаментов имеют северо-восточное или северо-западное простирание. Сейсмолинеаменты субширотного простирания имели место только в зоне региональных разломов этого же направления. Из линеаментов субмеридиональной ориентировки наибольшей протяженностью и сейсмической активностью характеризуется линеамент, проходящий параллельно Тастахскому разлому. Существование линейно упорядоченных сейсмолинеаментов преимущественно северо-восточной и северо-западной ориентировки в разные годы, вероятно, свидетельствует о большом влиянии на сейсмичность Восточного Приамурья процессов на границах соседних плит.

Ключевые слова: сейсмолинеаменты, региональные разломы, Восточное Приамурье.

**SEISMOLINEAMENTS OF EASTERN PRIAMURYE FROM THE ANALYSIS OF  
SEISMICITY DURING 1968-2009**

**Tatyana V. Merkulova**

*Yu. A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, 65, Kim Yu Chen St., Khabarovsk, e- mail: merculova@itig.as.khb.ru*

The paper examines the arrangement of earthquake foci during 1968-2009. The performed analysis of seismolineaments in time periods of 5-7 years has shown that the major part of these seismolineaments is of northeastern or northwestern strike. Sublatitudinally striking seismolineaments took place only in the regional fault zone of similar trending. As for lineaments of submeridional orientation, the seismolineament running parallel to the Tastakh fault is the most extended and seismically active one. Probably, the existence of linearly arranged seismolineaments of dominating northeastern and northwestern strike observed in different years testifies to a great influence of the processes occurring at the adjacent plate boundaries on seismicity of Eastern Priamurye.

Key words: seismolineaments, regional faults, Eastern Priamurye.

## **Введение**

В обзорной работе авторов [2] с достаточной полнотой освещены задачи линеаментного анализа, показана их актуальность для тектонического районирования территорий и других геологических задач. Линеаменты косвенно отражают особенности геологической структуры, часто трассируют зоны повышенной нарушенности, деформированности или раздробленности земной коры, а также могут свидетельствовать о подводящих каналах различных флюидов [2]. Особую актуальность линеаментный анализ принимает в сейсмоактивных зонах при оценке сейсмической опасности [6].

Для построения линеаментов используются разнородные данные: топографические карты, данные цифрового рельефа, карты магнитных, гравитационных аномалий и другие данные [2]. Изучение структур сейсмоактивных регионов, показывает, что очаги землетрясений не рассеяны хаотично, а приурочены к относительно узким линейным зонам - сейсмолинеаментам (сейсмогенерирующим линеаментам), в виде цепочек эпицентров землетрясений, которые характеризуются высокой упорядоченностью расположения сейсмических очагов и фиксируют следы современной активной переработки по протяженным линейным направлениям. Вдоль этих линейных направлений достаточно ярко выражены процессы миграции сейсмической активизации [8-10].

В данной работе исследована упорядоченность очагов землетрясений Восточного Приамурья (в виде сейсмолинеаментов) за период 1968-2009. гг. На основе выделения наиболее устойчивых сейсмолинеаментов установлена их связь с региональными разломами, показана тонкая структура сейсмичности и динамика современного сейсмического процесса.

Для анализа использованы все землетрясения с магнитудой  $M \geq 2.5$  из каталога ИТиГ ДВО РАН, в котором собрана информация об исторических и инструментально зарегистрированных землетрясениях каталогов «Землетрясения в России» и «Землетрясения Северной Евразии». Для построения сейсмолинеаментов методом подбора временного интервала определен оптимальный период от 4-х до 9 лет, на котором достаточно устойчиво проявляется упорядоченность землетрясений.

### **Сейсмолинеаментный анализ упорядоченности землетрясений**

Построение сейсмоактивных линеаментов за три периода 1968-1977 гг., 1978-1982 гг., 1983-1988 гг. (Рис. 1) показало, что большинство сейсмоактивных линеаментов имеют северо-восточное или северо-западное простирание. В единичных случаях сейсмолинеаменты ориентированы в субмеридиональном или субширотном направлениях, контролируемых активными тектоническими структурами соответствующих ориентировок. Например, в северо-западной части района исследований (см. Рис. 1) субширотные сейсмолинеаменты в плане совпадают с положением Станового разлома, а в центральной части хорошо выражен

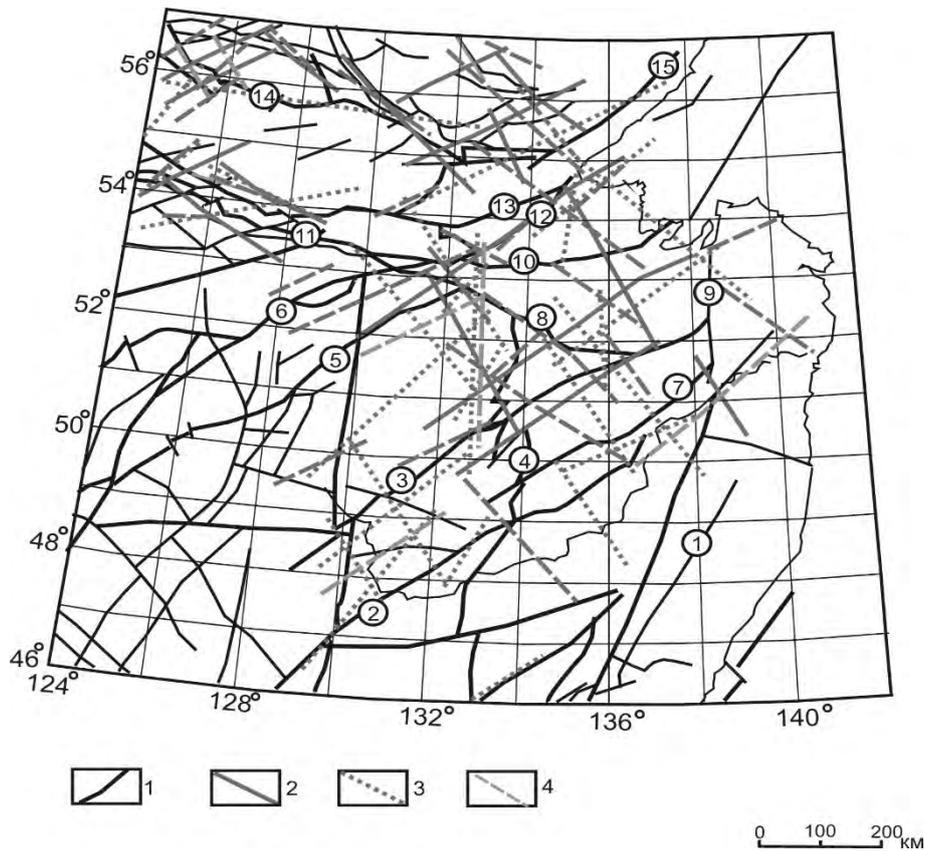


Рис. 1. Сейсмолинеаменты по анализу сейсмичности в 1968-1988 гг.

1 – региональные разломы по [5]; 2-4 – сейсмолинеаменты по анализу сейсмичности в периоды: 2 – 1968-1977 гг., 3 – 1978-1982 гг., 4 – 1982-1988 гг.

Цифры в кружках – региональные разломы по [5]: 1 – Центрально-Сихотэ-Алинский; 2 – Ишу-Харпинский; 3 – Хинганский; 4 – Тастахский; 5 – Селемджинский; 6 – Буссе-Норская р.з.; 7 – Курский; 8 – Пауканский; 9 – Лимурчанский; 10 – Тугурский; 11 – Южно-Тукурингский; 12 – Улигданский; 13 – Северо-Тукурингский; 14 – Становой; 15 – Джугжурский.

протяженный сейсмолинеамент субмеридионального направления, расположенный западнее Тастахского регионального разлома.

Линеаменты северо-восточного и северо-западного направлений концентрируются в виде фрагментарных зон сгущения, которые образуют перекрестный «решетчатый» структурный план. В южной части исследуемой площади пересечение линеаментов носит V-образный характер. В целом сейсмолинеаменты трассируются либо по отдельным сегментам крупных региональных разломов, либо вблизи их субпараллельно, в зоне динамического влияния разломов. Сейсмолинеаменты северо-западного направления пересекают разломы северо-восточного простирания.

Одной из составляющих сейсмолинеаментного анализа является проверка устойчивости линеаментов во времени, что существенно также для прогноза сейсмической опасности. Для проверки данного положения был проведен анализ пространственного положения линеаментов в расширенном диапазоне времени. Геометрические построения позволили установить, что для временного интервала 1988-1999 гг. характерно наличие всех

## ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

выделенных ориентировок сейсмолинеаментов, определенных за ранее принятые интервалы 1968-1988 гг., а также их устойчивость в интервалах 1988-1993 гг., 1993-1997 гг. и 1995-1999 гг. Для данных периодов установлена пространственная устойчивость линеаментов северо-восточного и северо-западного простираний. Для сейсмолинеаментов субширотного направления определены зоны динамического влияния крупных региональных разломов субширотного простирания (западного фрагмента Пауканского и Станового (см. Рис. 1), а для субмеридионального направления - Тастахского разлома. Дополнительно выделены два сейсмолинеамента, не совпадающих с региональными разломами.

В период 1995-1999 гг. в южной части исследуемой площади выделены достаточно протяженные сейсмолинеаменты северо-западного направления, которые были дополнены линеаментами за период 2000- 2009 гг.

В результате данных построений стало возможным построение схемы наиболее устойчивых сейсмолинеаментов Восточного Приамурья (Рис. 2). На этой схеме представлены сейсмолинеаменты, которые однозначно выделяются в разные временные периоды. Если в разные временные интервалы наблюдается сближенная система сейсмолинеаментов одного простирания, то на схему выносятся центральный сейсмолинеамент.

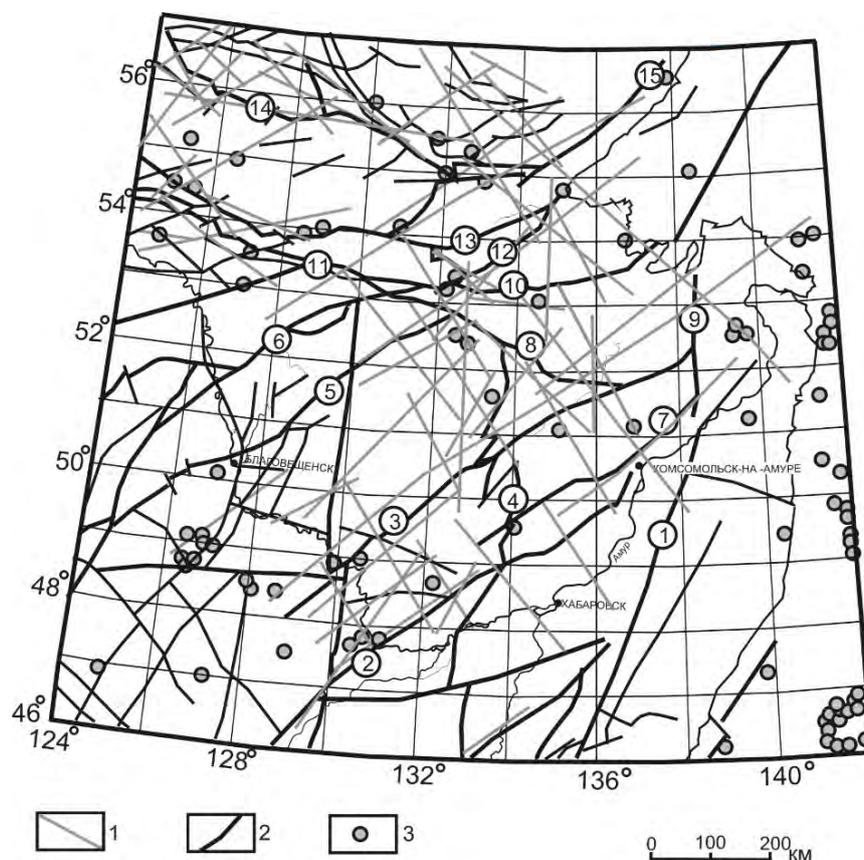


Рис. 2. Схема устойчивых сейсмолинеаментов Восточного Приамурья за период 1968-2009 гг.

1 – сейсмолинеаменты; 2 – региональные разломы; 3 – землетрясения с  $M \geq 5$ . Оцифровка разломов согласно Рис. 1.

### **Обсуждение результатов**

Для Восточного Приамурья отмечаются устойчивые сейсмолинеаменты разных ориентировок. Сейсмолинеаменты северо-восточного направления часто наблюдаются вблизи региональных разломов или их отдельных сегментов, вероятно, в зоне их динамического влияния. Сейсмолинеамент северо-восточной ориентировки с западной стороны проходит по всей длине Хинганского разлома и протягивается за его пределы к востоку. Сейсмолинеаменты этого же направления практически совпадают с отдельными сегментами Курского и Ишу-Харпинского разломов. Другие протяженные сейсмолинеаменты северо-восточного простирания захватывают части разных региональных разломов – Селемджинского и Улигданского. Сейсмолинеамент западнее северной части Буссе-Норской разломной зоны проходит севернее, и протягивается почти по всей длине Джугджурского разлома. Некоторые сейсмолинеаменты северо-восточного простирания располагаются между региональными разломами. Протяженный сейсмолинеамент отмечается между Хинганским и Селемджинскими разломами. В некоторых случаях сейсмолинеаменты северо-восточного простирания пересекают региональные разломы субширотной ориентировки. Широко распространены в районе работ устойчивые сейсмолинеаменты северо-западного простирания. Один из наиболее протяженных сейсмолинеаментов в северо-восточной части район исследования протягивается от окраины континента за пределы Станового разлома. Другой протяженный сейсмолинеамент этого же простирания примыкает к сегменту Пауканского разлома, ориентированному в северо-западном направлении. Пересекаясь системы сейсмолинеаментов северо-восточного и северо-западного направления, часто образуют структуры типа «решетки». К таким зонам пересечения северо-восточных и северо-западных разломов приурочены два из трех сейсмолинеаментов субмеридионального простирания. Устойчивые системы линеаментов субширотного направления отмечаются только в зоне динамического влияния крупных региональных разломов этого же простирания – Станового и Тугурского.

В данной работе глубины очагов землетрясений не рассматривались. Тем не менее, для анализа использованы именно коровые землетрясения с глубиной залегания гипоцентров от 5 до 70 км. Это косвенно может указывать на интенсивные упругопластические деформации глубинных ячеек земной коры Восточного Приамурья.

Основной особенностью развития сейсмического процесса в Восточном Приамурье является преимущественное группирование землетрясений в упорядоченные структуры широтного, северо-восточного и северо-западного простирания. Сейсмолинеаменты северо-восточного направления наблюдаются как в зонах динамического влияния региональных

разломов или их сегментов, так и между ними, вероятно, по разрывным нарушениям более низкого ранга.

Необходимо отметить, что региональные разломы северо-западного простирания в регионе не выделяются [5]. К разломам данного заложения можно отнести юго-восточный сегмент Пауканского разлома и отдельные небольшие по протяженности разрывные нарушения северо-западного простирания, которые выделяются на геологических картах масштаба 1:1000 000. Это же направление выделено авторами [7] в Нижнем Приамурье на основе анализа ориентировок морфоструктур в виде тополинеаментов.

Сопоставление сейсмолинеаментов, выделенных в данной работе за инструментальный период наблюдений за сейсмичностью региона, со схемами структурно-геологического картирования и результатами тополинеаментного анализа [7] позволило на качественном уровне провести соответствие сейсмолинеаментов тополинеаментам и зонам сгущения разрывных нарушений (Рис. 3).

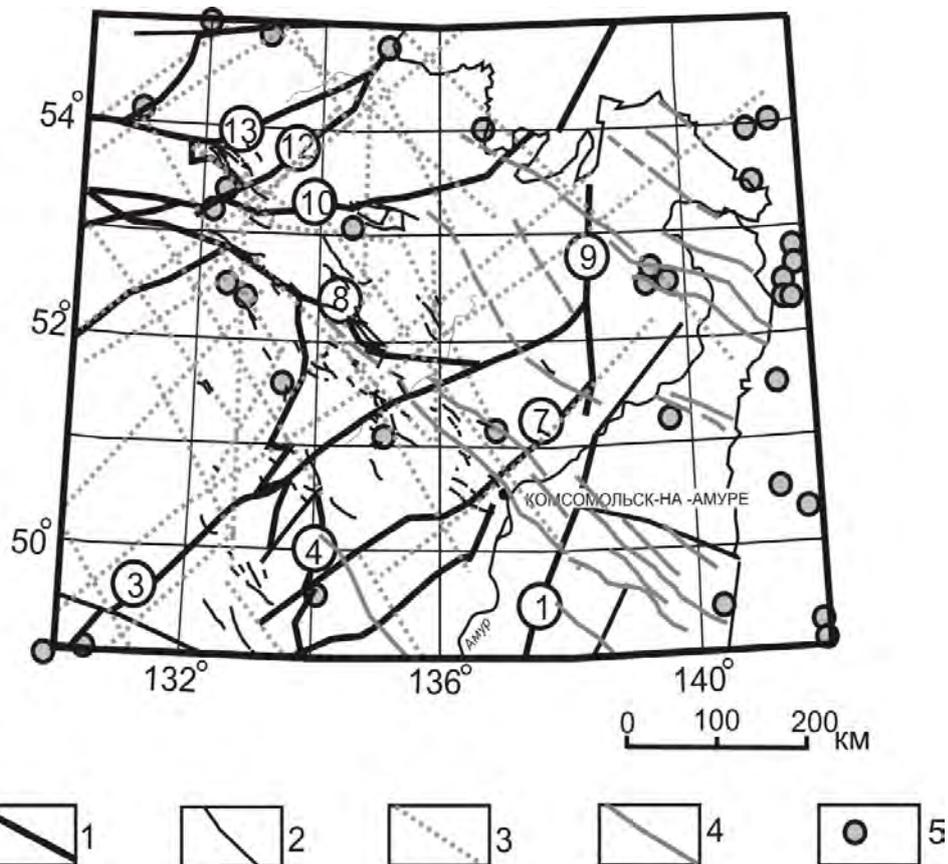


Рис. 3. Соотношение сейсмолинеаментов с разрывными нарушениями и линеаментами северо-западного простирания по [7]

1 – региональные разломы; 2 – разрывные нарушения северо-западного простирания; 3 – устойчивые сейсмолинеаменты за период 1968-2009гг.; 4 – линеаменты по [7]. Остальные условные см. на Рис. 1.

Существование преобладающего северо-восточного и северо-западного простираний сейсмолинеаментов, вероятно, связано с влиянием двух важных для тектоники Восточной

## **ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА**

Азии процессов – субдукции под Евразию Тихоокеанской плиты и вытеснение на восток или северо-восток небольших (коровых) плит, как результат отдаленного воздействия коллизии Индийской и Евразийской плит [1, 3, 4]. Системы ортогональных решеток северо-западного сегмента изучаемой территории выделены автором [7] по результатам анализа геофизических полей. Геологическая природа данных построений установлена на основе детальных геолого-геофизических исследований систем активных разломов [9, 10].

Распространение сейсмолинементов северо-западного направления от побережья Тихого океана, а иногда и от Тихоокеанской зоны субдукции и соответствие их простираения северо-западному направлению движения Тихоокеанской плиты, позволяет предположить, что сейсмическая активность этих линементов обусловлена процессами на границе Тихоокеанской плиты с континентальными плитами [1, 3, 4] и, возможно, миграционными процессами сейсмической активности посредством деформационных волн [8-10].

Возникновение упорядоченных зон сейсмолинементов в северо-восточном, а возможно, и в субмеридиональном направлении связано, по мнению авторов [1, 3, 4], с влиянием процессов в зоне коллизии Индийской и Евразийской плит.

### **Выводы**

1. Установлено пространственное положение и ориентировка сейсмолинементов Восточного Приамурья для различных временных интервалов за инструментальный период наблюдений за сейсмичностью региона.

2. Выделены пространственные зоны устойчивого развития сейсмического процесса. Показано, что сейсмолинементы северо-восточной ориентировки часто приурочены к зонам динамического влияния региональных разломов. Сейсмолинементы северо-западной ориентировки не подтверждаются на тектонических и геолого-структурных схемах, однако отражаются в ориентировках морфоструктур.

3. Основным результатом данного исследования можно считать обнаружение устойчивых сейсмолинементов за инструментальный период наблюдений. Этот результат может послужить основанием для разработки детальной схемы сейсмической опасности в различные интервалы времени и является предметом дальнейших исследований, актуальность которого представляет несомненную научную и практическую значимость в вопросах сейсмической безопасности сейсмоактивного региона.

### **Благодарности**

Работа выполнена по программе «Дальний Восток», грант Дальневосточного отделения РАН 15-I-2-014. Автор выражает благодарность д. г.-м. н., в.н.с. ИТиГ ДВО РАН С.В. Трофименко за полезные советы и обсуждение результатов исследования.

**Список литературы**

1. Имаев В.С. Буферные сейсмогенные структуры // Тихоокеанская геология. - 2003.- Т.22, №6. - С.55-61.
2. Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф. Основы линейной тектоники. – М.: Недра, 1986. - 140 с.
3. Степашко А.А. Глубинные основы сейсмоструктуры Дальнего Востока: Приамурская и Приморская зоны // Тихоокеанская геология. - 2011. -Т.30, №1. - С. 3-15.
4. Тимофеев В.Ю., Горнов П.Ю., Ардюков Д.Г., Малышев Ю.Ф., Бойко Е.В. Результаты анализа данных GPS измерений (2003-2006) на Дальнем Востоке по Сихотэ-Алинской сети // Тихоокеанская геология. - 2008. - Т.27, №4. - С.39-49.
5. Тектоника, глубинное строение и минерагения Приамурья и сопредельных территорий // - Спб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. - 190с.
6. Уломов В. И. Глобальная упорядоченность сейсмогеодинамических структур и некоторые аспекты сейсмического районирования и долгосрочного прогноза землетрясений // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. - Вып.1. - М: ОИФЗ РАН, 1993. - С.24-44.
7. Уфимцев Г.Ф., Алексеенко С.Н., Онухов Ф.С. Морфотектоника Нижнего Приамурья // Тихоокеанская геология. - 2009. - Т.28, №6. - С.81-93.
8. Trofimenko S.V., Bykov V.G., Merkulova T.V. Seismicity migration in the zone of convergent interaction between the Amur plate and the Eurasian plate // Journal of Volcanology and Seismology. - 2015. -Vol. 9, №. 3. - P. 210-222.
9. Trofimenko S. V., Bykov V.G. The model of crustal block movement in the South Yakutia geodynamic testing area based on GPS data // Russian Journal of Pacific Geology. -2014. -Vol. 8, № 4. - P. 247-255.
10. Ovsyuchenko A. N., Trofimenko S. V., Marakhanov A. V., Karasev P. S., and Rogozhin E. A. Seismotectonics of the Transitional Region from the Baikal Rift Zone to Orogenic Rise of the Stanovoi Range // Geotectonics. - 2010. - Vol. 44, № 1. -P. 25-44.

*Мы окружены структурами, которые сформировались в ходе исторического развития Земли, будь то структуры, изучаемые химией, геологией или биологией. Мы должны искать их происхождение в последовательности бифуркаций.*

*И. Пригожин*

## **БАЙКАЛЬСКАЯ РИФТОВАЯ СИСТЕМА: ПРИЗНАКИ НЕЛИНЕЙНОЙ САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ**

**Ключевский А.В.**

*Институт земной коры СО РАН, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, e-mail: akluchev@crust.irk.ru*

**Описаны признаки самоорганизации и нелинейности Байкальской рифтовой системы. Значительные изменения азимутов движения пунктов GPS в районе южного Байкала указывают на нелинейную геодинамику.**

Ключевые слова: Байкальская рифтовая система, нелинейная геодинамика, данные GPS.

## **BAIKAL RIFT SYSTEM: SIGNS OF NONLINEAR SELF-ORGANIZING SYSTEM**

**Anatoly V. Klyuchevskii**

*Institute of the Earth Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 128, Lermontova Str., e-mail: akluchev@crust.irk.ru*

**The signs of self-organization and nonlinearity of the Baikal rift system are described. Significant changes in the azimuth movement points GPS in Southern Lake Baikal indicate nonlinear geodynamics.**

Key words: Baikal Rift System, nonlinear geodynamics, GPS data

### **Введение**

В современной науке в основе представлений о строении материального мира лежит системный подход, согласно которому любой объект, будь то атом, планета, организм или галактика может быть рассмотрен как сложное образование, включающее составные части, организованные в целое [7]. Методологическая специфика системного подхода определяется тем, что он ориентирует исследование на раскрытие целостности объекта и обеспечивающих её механизмов, на выявление многообразных типов связей сложного объекта и сведение их в единое теоретическое обобщение. Для обозначения целостности объектов в науке выработано понятие системы, которое в БСЭ имеет вид: совокупность элементов и связей между ними, образующих изолированную часть материи, которая обладает набором свойств и характеристик.

## *ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА*

Совокупность связей между элементами образует структуру системы, а устойчивые связи элементов определяют упорядоченность системы. Существуют два типа связей между элементами системы – по горизонтали и по вертикали. Связи по горизонтали – это связи координации между элементами одного порядка, и они носят коррелирующий характер: ни одна часть системы не может измениться без того, чтобы не изменились другие части. Связи по вертикали – это связи субординации, соподчинения элементов: они выражают сложное внутреннее устройство системы, где одни части по своей значимости могут уступать другим и подчиняться им. Вертикальная структура включает уровни организации системы, а также их иерархию. При классификации систем выделяются статичные и динамические системы. Для статичной системы её состояние с течением времени остаётся постоянным, а динамическая система изменяет своё состояние во времени. Поведение динамических систем описывается с помощью дифференциальных уравнений. Колебательные системы, в которых протекают процессы, описываемые нелинейными дифференциальными уравнениями, называются нелинейными системами. Свойства и характеристики нелинейных систем зависят от их состояния, а процессы в них не удовлетворяют принципу суперпозиции. Все реальные физические системы нелинейны и их можно считать линейными лишь приближённо при малой интенсивности колебательных и волновых процессов. По характеру взаимоотношения система–среда системы делятся на закрытые – замкнутые (в них не поступает и из них не выделяется вещество, происходит лишь обмен энергией) и открытые – незамкнутые (постоянно происходят ввод и вывод не только энергии, но и вещества).

Под понятием самоорганизация понимается процесс, в ходе которого создаётся, воспроизводится или совершенствуется организация сложной динамической системы. Процессы самоорганизации могут иметь место только в системах, обладающих высоким уровнем сложности и большим количеством элементов, связи между которыми имеют не жёсткий, а вероятностный характер. Субстанциональной основой самоорганизующихся систем выступает системообразующий фактор – стремление системы к максимальной устойчивости в конкретных условиях существования, что означает её функционирование с минимальными затратами энергии. Максимальная устойчивость является конечной целью существования и развития системы, на языке математики и синергетики – её аттрактором. Этому главенствующему принципу подчиняются все законы функционирования, развития и организации системы: дифференциация, интеграция и иерархизация элементов, автоколебательный режим, фазовые переходы, типы связей и этапы развития. Самоорганизующиеся системы способны при активном взаимодействии со средой изменять свою структуру, сохраняя в то же время свою целостность и действуя в рамках закономерностей, присущих окружению, выбирать одну из возможных линий поведения.

Один из примеров самоорганизации в нелинейных системах – возникновение пространственного порядка из начального беспорядка и образование сложных пространственных структур в неоднородных протяжённых неравновесных системах, таких как Байкальская рифтовая система (БРС).

### **Системность БРС**

При изучении системных процессов исследователи пытаются подтянуть геологию до уровня точных наук, но это удастся пока только в отношении вещественных геологических дисциплин – кристаллографии, минералогии, геохимии, петрологии, геофизики. Затем в иерархическом ряду объектов и наук уровень познания снижается вплоть до уровня 10% истинности (геоистория, тектоника) [7]. Причина этого не только в недостатке информации при ретроспективном анализе, но и в необычайной сложности, многоплановости, специфичности геологических объектов и процессов. Законы точных наук в одежде геологической специфики теряют свою детерминационную природу и ведут к неоднозначным результатам. Здесь одинаковые геологические объекты, например, могут иметь полигенетическое происхождение [2]. В результате детерминизм закона растворяется в неповторимости явлений и вырождается в эмпирическое обобщение, трактуемое и интерпретируемое различным образом разными группами исследователей. Это в полной мере относится к истории образования и геодинамике БРС [3 и ссылки в ней].

Понятие Байкальская рифтовая система возникло, очевидно, под влиянием термина мировая система рифтов, характеризующего систему океанических и континентальных рифтов, имеющих общую протяженность около 70 000 км. Такие размеры придают этим структурам глобальное значение и заставляют связывать их с какими-то общими закономерностями развития литосферы рифтовых структур и земного шара. Рифтовая система, в том числе и Байкальская, в геологическом смысле воспринимается, прежде всего, как естественная, природная система рифтовых впадин, которая может быть классифицирована по субстрату как рифтогенная, основанная на процессах рифтогенеза. БРС протягивается системой разноориентированных рифтовых впадин и обрамляющих их структур из северо-западной Монголии вдоль оз. Байкал к южной Якутии на расстояние почти 2200 км и занимает Саяно-Байкальское поднятие, являющееся самой возвышенной частью восточносибирских и северомонгольских нагорий и поднимающееся на флангах до 3000-3500 метров над уровнем моря [3]. Расположение кайнозойских рифтогенных структур обусловлено сложной геологической историей развития региона, контрастным различием в термомеханических свойствах прилегающих территорий и ослабленной литосферой в месте развития рифта. В настоящее время доминирует представление о суперпозиции внешних и внутренних геодинамических сил при формировании и эволюции БРС, что свидетельствует об

## *ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА*

открытости системы. БРС сформирована как изолированная система, не связанная пространственно с другими континентальными или океаническими рифтами, и имеет слабый вулканизм и высокую сейсмическую активность.

БРС характеризуется определенным единством, целостностью и индивидуальностью: она выделена из окружающей среды и отличается от нее как геолого-геофизический мантийно-коревый объект, имеющий границы и присущие ему свойства, которые дают возможность детерминировать границу между системой и средой. Так как БРС имеет зонно-блоковую структуру литосферы, продольная и поперечная дискретность которой формируется зонами глубинных разломов, секущими и уходящими за пределы БРС, можно полагать, что между системой и окружающей средой, а также между элементами системы имеются горизонтальные и вертикальные каналы связи. Наличие астеносферного диапира, вызвавшего растяжение коры и образование БРС, свидетельствует о вертикальных каналах связи и определяет природу системообразующего фактора – движущей силой внутриплитного рифтогенеза в Восточной Сибири является поднятие и боковое растекание материала астеносферы, вызванное тепловой и гравитационной неустойчивостью литосферы и мантии. Этот системообразующий фактор выражает смысл системы, который обычно называют эмерджентным свойством системы, т.е. свойством, которым обладает система, но не обладают какие-либо ее части сами по себе. Геодинамические процессы, пространственная структура и реологические свойства БРС формируют соотношения между элементами и эволюцию системы. В.П. Солоненко выделяет с сейсмогеологической точки зрения среди впадин байкальского типа следующий иерархический ряд: зарождающиеся – эмбриональные – зрелые – отмирающие. При этом он подчеркивает [6, с. 66], что развитие зарождающихся и эмбриональных впадин знаменует качественно новый этап в эволюции Байкальской рифтовой системы. Элементы и структура БРС вторичны по отношению к системообразующему фактору, который определяет, что является элементами системы, каково их структурное взаимоотношение и какова их дальнейшая судьба.

Таким образом, по ряду признаков, характеристик и определений БРС следует классифицировать как самоорганизующуюся открытую нелинейную динамическую систему, иерархически развивающуюся на рифтогенном субстрате в стохастическом процессе горизонтальных и вертикальных связей. В настоящее время определен системообразующий фактор, выделены границы и структурная иерархия главных элементов системы, рассмотрены основные этапы ее геологической эволюции. Однако некоторые параметры и характеристики БРС как системы до сих пор остаются слабо изученными и понятными. К ним относятся и системообразующие, т.е. обеспечивающие обособленное функционирование и развитие системы: по отношению к управлению и цели, по степени связности и видоизменяемости и некоторые другие. В работе [5] приведена классификация типов систем по числу элементов и

## **ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА**

характеру их связей, согласно которой простые системы включают порядка  $10^3$ , большие саморегулирующиеся – до  $10^6$ , саморазвивающиеся –  $10^{10}$ - $10^{14}$  элементов. На основании этой классификации для простой характеристики геолого-геофизической системы можно использовать сейсмичность: при отсутствии или слабой сейсмической активности геосистема линейна, увеличение активности указывает на рост нелинейности системы, а высокий уровень сейсмической активности БРС отражает ее повышенную нелинейность.

### **Отражение нелинейной геодинамики БРС в данных GPS**

При изучении параметров сейсмических источников в литосфере БРС выделены три пространственные структуры-аттракторы рифтогенеза (САР), расположенные в районе Южно-Байкальской, Хубсугульской и Муйской впадин [10]. Временные аттракторы рифтогенеза БРС отражают структуру «сборки» в рамках сценария эволюции с бифуркациями трехкратного равновесия [9]. В соответствии с теорией диссипативных динамических систем аттракторы и серии бифуркаций определяют ключевые особенности и свойства кайнозойской геодинамики БРС – нелинейность, неоднородность и неустойчивость. В литосфере БРС напряжения формируются пространственно-временной суперпозицией глобального квазистационарного поля напряжений сжатия литосферы Земли и переменных воздействий трех САР, в каждой из которых с периодичностью около 10 лет происходят регионально-синхронизированные циклические импульсные процессы расширения и медленные релаксирующие процессы возвращения в состояние рифтогенеза. Особенности импульсного нелинейного поведения САР находят отражение в пространственно-временных изменениях сейсмичности и напряженно-деформированного состояния среды [9, 10 и ссылки в них]. Импульсное расширение САР и рост горизонтальных напряжений приводит к кратковременному повышению относительного числа толчков-сдвигов и взбросов. Эпизоды синхронизации годовых чисел землетрясений свидетельствуют, что происходящие при бифуркациях деформации среды отражаются на огромной территории Монголо-Байкальского региона. Особенности сеймотектонического течения геологического материала отражают закономерности неоднородного нелинейного объемного деформирования литосферы БРС и обусловлены перераспределением напряжений и деформаций внутри литосферы региона между тремя САР, когда области сжатия чередуются с областями растяжения. В упругом приближении Гука векторы напряжения и деформации коллинеарны, и инверсии вектора напряжений при бифуркациях обусловят соответствующие трансформации вектора деформации. Ниже представлены результаты статистической переработки данных GPS (Global Positioning System) геодезии, которые интерпретируются как эффекты нелинейной геодинамики БРС.

В последнее время при изучении геодинамики регионов широко используются данные GPS геодезии, позволяющие определить относительные скорости устойчивого движения жестких блоков литосферы. Обычный подход к изучению динамики процесса деформирования по данным о скоростях годовых перемещений пунктов GPS невозможен, так как исходные материалы у нас отсутствуют. Используемые нами данные GPS взяты из двух основных публикаций коллектива авторов [4, 8], последовательно расширяющего пространственно-временной интервал измерений на GPS-пунктах сети Байкало-Монгольского геодинамического полигона (БМГП). В работе [8] представлены результаты расчетов векторов горизонтальных скоростей пунктов GPS за 1994-2002 гг., а в работе [4] – материалы обработки GPS измерений за период с 1994 по 2007 годы. Современные методы спутниковой геодезии дают возможность определять направления и скорости пунктов GPS и на основании этих данных характеризовать устойчивое движение тектонических структур. Этой цели подчинены приведенные в [4, 8] результаты, которые характеризуют средний за анализируемый период времени вектор относительной горизонтальной скорости каждого пункта GPS. Такое осредненное представление результатов затрудняет анализ изменений во времени скорости перемещений пунктов GPS, который необходим для выявления особенностей их движения в условиях импульсной нелинейной геодинамики БРС. Следует также отметить, что для оценки средних скоростей перемещений GPS-пунктов БМГП используются методы обработки стационарных процессов, что затрудняет выделение импульсного сигнала или затухающего во времени колебательного процесса, свойственного описанной выше геодинамике БРС. Чтобы проиллюстрировать изменение особенностей колебательного или импульсного поведения, 9 колебательных и импульсных сигналов были оценены методами обработки стационарных процессов в условиях, имитирующих возможные перемещения пунктов GPS при различных типах геодинамики. К каждому сигналу были применены методы обработки стационарных процессов, а полученный в результате типичный «средний» график (кривая 2) представлен на рисунке 1 для суперпозиции стационарного сигнала с амплитудой 0.5, набора импульсов амплитудой 0.3 в 0, 10, 20...70 отсчет и случайной помехи с амплитудой от 0 до 0.05 (кривая 1). Видно, что результирующий средний сигнал быстро уменьшается и не превышает одного стандартного отклонения, задаваемого величиной импульсного сигнала. Таким образом, в результате примененной обработки суперпозиция стационарного и импульсного сигналов приобретает со временем вид квазистационарного процесса. Из рисунка 1 следует, что осредненные за какой-то период времени амплитуды горизонтальных скоростей пунктов GPS не позволят выявить колебательный или импульсный вид естественных процессов. Однако для имитированных сигналов «скачки» импульсов превышают стандарт и, очевидно, могут быть выделены по материалам GPS при

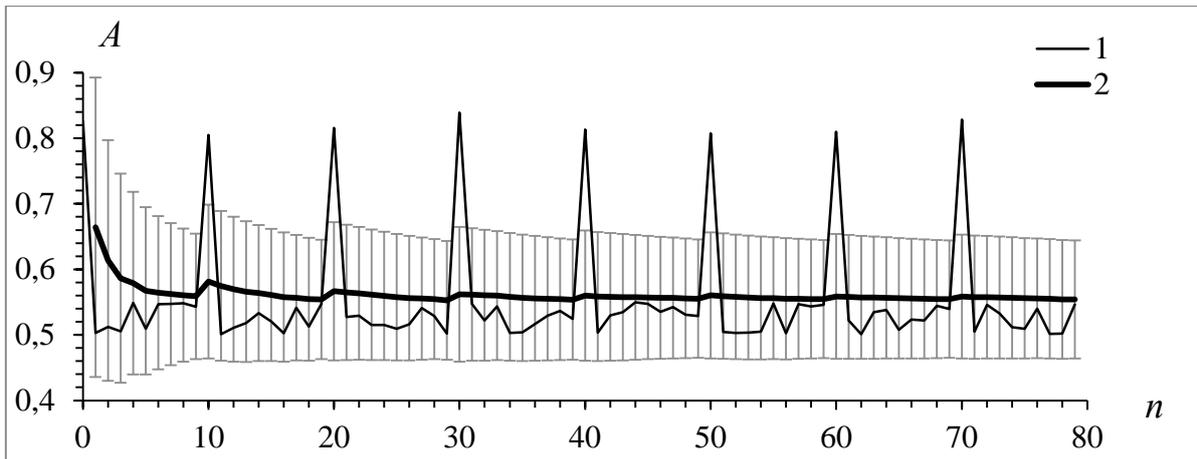


Рис. 1. Иллюстрация применения методов обработки стационарных процессов

1 – исходная суперпозиция стационарного сигнала с амплитудой 0.5 и набора импульсов амплитудой 0.3 в 0, 10, 20...70 отсчет, осложненная помехой; 2 – результирующий сигнал принимает квазистационарный вид с ростом числа отсчетов.

ориентированном на это анализе. Так, например, по данным GPS в 1997 году пос. Листвянка, расположенный на западном берегу оз. Байкал, приподнялся относительно расположенного в платформенной части города Иркутска на 1-2 см [1]. Мы полагаем [10], что этот подъем обусловлен объемным расширением Южно-Байкальской САР.

Эффекты нелинейной геодинамики БРС нашли отражение в азимутах перемещений GPS-пунктов. На рисунке 2 представлена гистограмма (ряд 1) разностей азимутов перемещений 36 общих пунктов GPS за 1994-2002 гг. и за 1994-2007 гг., вычисленных по материалам из [4, 8]. Видно, что максимум формируется в диапазоне от  $-60^\circ$  до  $30^\circ$  и имеется смещение данных в область отрицательных значений.

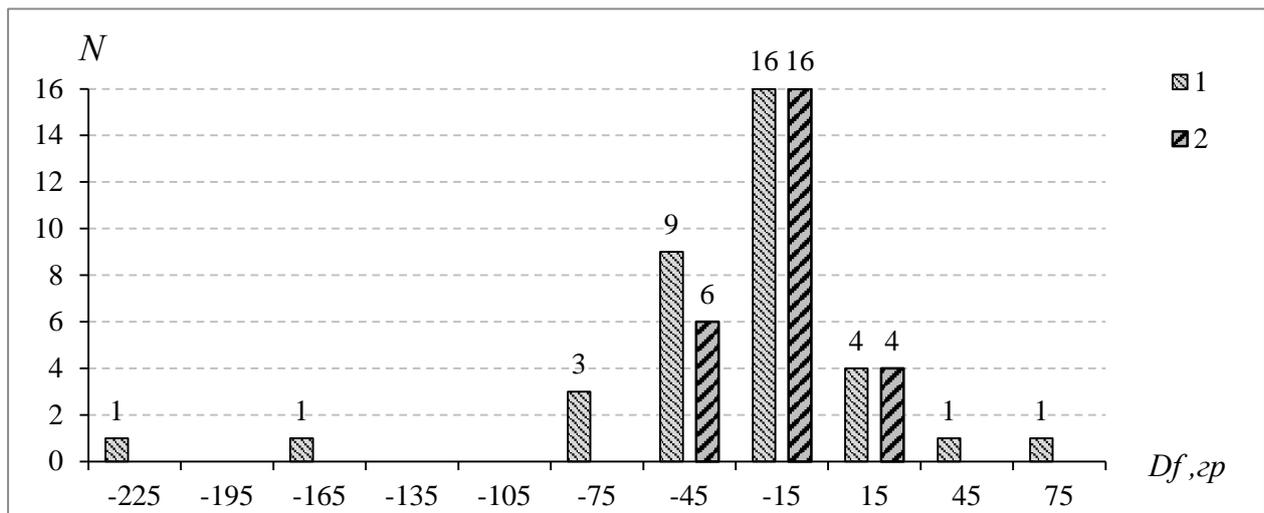


Рис. 2. Гистограммы разностей азимутов перемещений пунктов GPS по данным за 1994-2002 гг. и за 1994-2007 гг.

1 – для 36 общих пунктов, 2 – удалены 9 указанных в тексте пунктов с максимальными разностями азимутов.

Максимальными отличиями азимутов характеризуются пункты HARA (-227°) и LIST(-163°), что указывает на смену направления смещений этих пунктов на обратное, т.е. на инверсию вектора деформаций. В пунктах KULT, MOND и ANGA модули разности азимутов составляют примерно 83°, 81° и 80° соответственно, в пункте TURK ~ 70°, в пункте NSEL ~ 60°, в пунктах SLYU и ORLK ~ 54° и 50° соответственно. Все указанные пункты находятся в южной части БРС и окружают CAP с разных сторон. Если удалить эти пункты из анализа, то гистограмма разности азимутов принимает вид нормального распределения (рис. 2, ряд 2).

### **Заключение**

Таким образом, БРС является самоорганизующейся открытой нелинейной динамической системой, иерархически развивающейся на рифтогенном субстрате в стохастическом процессе горизонтальных и вертикальных связей. Будучи целеполагающей, эта система способна активно и целенаправленно осуществлять собственное развитие, собственное воспроизводство и собственное усложнение. Отсюда следует, что каждый из всего множества больших и малых процессов в литосфере БРС несет в себе в качестве своего сущностного ядра момент целевой предназначенности. Этот факт служит той системой отсчета, которая позволяет теоретической геологии и геофизике увидеть всю геолого-геофизическую историю, данность и перспективу.

### **Список литературы**

1. Гольдин С.В. Дилатансия, переупаковка и землетрясения // Физика Земли. – 2004. – № 10. – С. 37–54.
2. Летников Ф.А. Синергетика геологических систем. – Новосибирск: Наука, 1992. – 230 с.
3. Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика. – 2003. – Т.44. – №5. – С. 91–106.
4. Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Кале Э. Вращения и деформации земной поверхности в Байкало-Монгольском регионе по данным GPS-измерений // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51. – №7. – С. 1006–1017.
5. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1981. – 186 с.
6. Солоненко В.П. Сейсмотектоника и современное структурное развитие Байкальской рифтовой зоны / Байкальский рифт. – М.: Наука, 1968. – С. 57–71.
7. Философия современного естествознания [Под ред. С.А. Лебедева]. М.: ФАИР-ПРЕСС, 2004. – 304 с.
8. Calais E., Vergnolle M., San'kov V., Likhnev A., Miroshnitchenko A., Amarjargal S., Deverche`re J. GPS measurements of crustal deformation in the Baikal-Mongolia area (1994–2002): implication for current kinematics of Asia // Journal of geophysical research. – 2003. – V. 108(B10). – P. 2501.
9. Klyuchevskii A.V. Nonlinear geodynamics of the Baikal Rift System: an evolution scenario with triple equilibrium bifurcation // Journal of Geodynamics. – 2010. – V. 49 (1). – P. 19–23.
10. Klyuchevskii A.V. Rifting Attractor Structures in the Baikal Rift System: Location and Effects // Journal of Asian Earth Sciences. – 2014. – V. 88. – P. 246-256.

**ГРУППЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ГРУППИРУЮЩАЯСЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ В  
ЛИТОСФЕРЕ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ**

**Ключевская А.А., Демьянович В.М., Ключевский А.В., Зуев Ф.Л., Какоурова А.А.**

*Институт земной коры СО РАН, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, e-mail: akluchev@crust.irk.ru*

**Описаны проблемы и основные результаты исследования групп землетрясений и группирующейся сейсмичности в литосфере Байкальской рифтовой системы.**

Ключевые слова: Байкальская рифтовая система, группы землетрясений, группирующаяся сейсмичность

**EARTHQUAKE GROUPS AND GROUPING SEISMICITY IN THE BAIKAL RIFT  
SYSTEM LITHOSPHERE**

**A.A. Klyuchevskaya, V.M. Dem'yanovich, A.V. Klyuchevskii, F.L. Zuev, A.A. Kakourova**

*Institute of the Earth Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 128,  
Lermontova Str., e-mail: akluchev@crust.irk.ru*

**The problems and the main results of the earthquake groups and grouping seismicity study in the Baikal rift system lithosphere are described.**

Key words: Baikal Rift System, groups of earthquakes, grouping seismicity

**Введение**

Мониторинг землетрясений и накопление длинных рядов сейсмологических данных создают основу для современного взгляда на пространственно-временную и энергетическую структуру сейсмичности. С большой долей уверенности можно утверждать, что сложный характер пространственно-временных и энергетических вариаций сейсмичности, в том числе и группы толчков, отражает основные свойства реальной геолого-геофизической среды – ее иерархическое блоковое строение, способность накапливать и выделять поступающую энергию не только медленно, но и катастрофическим образом, нелинейность, реологическую неоднородность, временную изменчивость и неустойчивость. Сейсмичность обладает фрактальной пространственно-временной и энергетической структурой, сформированной каскадами бифуркаций системы напряжений при самоорганизации блоковой иерархической геолого-геофизической среды. Структура сейсмичности подвержена влиянию различного рода прямых и обратных связей, выявить и изучить которые в «фоновом» процессе трудно, так как вариации стационарной сейсмичности слабы и природа их обычно не известна. Переход от стационарной к импульсной сейсмичности с последующим восстановлением

## *ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА*

стационарности отражает релаксацию геолого-геофизической среды и служит примером нелинейности сейсмического процесса. Релаксационные процессы являются реакцией какой-либо системы на сильное (в масштабе системы) воздействие различной природы, которое выводит ее из стационарного состояния. Анализ релаксационных процессов занимает особое место в изучении природы формирования и эволюции сейсмичности; он дает возможность прояснить структуру и особенности строения среды, а также изучить динамику отклика на сильное возмущение. С физико-математической точки зрения переходные релаксационные процессы сглаживают разрывность, восстанавливают и приводят в соответствие связи между разными уровнями иерархии системы напряжений, нарушенные бифуркациями.

Переходные релаксационные процессы в геолого-геофизической среде проявляются группами афтершоков и роевых толчков, и одной из основных задач статистического исследования сейсмичности является изучение групп толчков и группирующихся землетрясений [1, 8]. Для решения этой задачи необходимо развитие методики разделения «фоновой» и «случайной» компонент сейсмичности. В отличие от единичных сейсмических событий, отражающих в целом стохастичность дискретной сейсмичности, группы толчков являются яркой аномалией в пространственно-временном распределении землетрясений. Они могут быть с высокой степенью достоверности выделены на заданном уровне значимости и проинтерпретированы как статистические ансамбли. Этот другой уровень организации сейсмичности, как и сильные землетрясения, характеризует системные свойства сейсмогенеза и современной геодинамики в обобщенном виде. Кроме того, серии толчков играют важную роль при изучении реологии и напряженно-деформированного состояния среды в очаговой зоне сильного землетрясения и в локальной области роя. Исследованию афтершоковых и роевых последовательностей толчков в Байкальской рифтовой системе (БРС) посвящено множество работ, в которых рассмотрены пространственно-временные и энергетические распределения событий, оценены параметры среды и определены динамические характеристики очагов землетрясений. Установлено, что группирование является одним из основных свойств совокупностей землетрясений БРС, а поскольку соответствие свойств сейсмичности и литосферы уменьшается с ростом кластеризации, то насыщенность литосферы группирующимися событиями предопределяет сильную пространственно-временную зависимость и изменчивость оценок общей сейсмичности и сейсмического процесса от групп землетрясений. Это определяет актуальность задачи выделения и классификации группирующихся землетрясений с целью последующего изучения пространственно-временного и энергетического распределения афтершоковых серий и роев землетрясений, анализа и учета степени их влияния на региональную сейсмичность, создания и тестирования моделей для описания «фоновой» и «случайной» составляющих

сейсмического поля и процесса. Изучение особенностей пространственно-временного и энергетического распределения групп толчков способствует решению фундаментальных проблем геофизики, тектонофизики и геодинамики литосферы БРС.

### **Выделение групп толчков в литосфере БРС**

Логическая цепочка изучения какого-либо явления или процесса обычно имеет вид:

*а.* Накопление экспериментальных данных с предварительной обработкой;  
*б.* Понимание основных закономерностей и связей изучаемого объекта на базе простых физико-математических моделей и полуформализованных способов обработки;  
*в.* Построение полной адекватной физико-математической модели с формализованным интерфейсом. История изучения группирующейся сейсмичности БРС хорошо вписывается в такую логическую цепочку [2]. На начальном этапе для выделения немногочисленных групп толчков использовался визуальный способ с описанием пространственно-временного распределения групп и группирующихся событий. На смену ему пришел полуформализованный метод, когда группы и толчки выделяются визуально с помощью компьютера, при обработке применяются компьютерные программы и построения, а результат контролируется специалистом. Поскольку группы афтершоков и группы роевых событий имеют разную физическую природу и разные законы распределения толчков во времени, пространстве и энергии, то для соблюдения методической однородности выделения группирующихся землетрясений БРС нами традиционно применяется полуформализованный метод скользящего окна [5]. На первом этапе были исследованы скорости потока всех внесенных в «Каталог землетрясений Прибайкалья» сейсмических событий за 1966–2008 годы, произошедших в площадках размером  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  (а также в площадках  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$  с шаговым сдвигом в  $1^{\circ}$  по широте и долготе). За этот период в регионе выделено 658 «основных» групп толчков: из них 103 и 519 – афтершоковые и роевые последовательности, а 36 – взрывы. Эти группы отнесены к «основным», поскольку совокупности группирующихся землетрясений, задающие уровень «скачка» и форму графика скорости потока сейсмических событий, позволяют выделять кластеры разной природы по единой применяемой методике. Полученные материалы собраны в «Каталог групп сейсмических событий Прибайкалья» и «Каталог группирующихся землетрясений Прибайкалья», на основе которых построены карты распределения групп толчков и плотности групп толчков по территории региона для всей совокупности сейсмических кластеров, а также для афтершоковых и роевых последовательностей отдельно. Результаты этого первого приближения показали, что каждое четвертое землетрясение БРС является афтершоком или роевым событием.

Дальнейшие исследования показали, что однородность и полнота выделения групп толчков зависят от скорости потока землетрясений и количества толчков в анализируемой

## ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

выборке данных [3]. Так при невысокой скорости потока и небольшом числе толчков выделяются практически все группы, но чем выше скорость потока и больше число землетрясений в анализе, тем меньше вероятность выделения небольших групп слабых землетрясений. Эта проблема существенно усложняет получение однородного полного «Каталога групп сейсмических событий Прибайкалья» и для равновероятного выделения групп землетрясений необходимо анализировать выборки толчков примерно одного объема. Применение такого способа декластеризации в площадке с координатами  $\varphi=51-52^\circ$  с.ш.,  $\lambda=98-99^\circ$  в.д. показало [6], что в результате детальной поэтапной 4-х шаговой декластеризации выборок данных в итоговых 8 «очищенных» массивах не осталось групп толчков, а в каждом из массивов оказалось примерно одинаковое количество землетрясений. В целом эти факторы указывают на однородность процедуры выделения групп толчков и стационарность «фоновой» сейсмичности. Для контроля декластеризации использованы клеточная  $D_0$ , информационная  $D_1$  и корреляционная  $D_2$  фрактальные размерности. Начальная выборка данных имеет отличающиеся размерности:  $D_0=1.62\pm 0.03$ ;  $D_1=1.41\pm 0.03$ ;  $D_2=1.09\pm 0.06$ , а размерности конечной выборки «фоновой» сейсмичности, фактически совпадают  $D_0=1.64\pm 0.02$ ;  $D_1=1.62\pm 0.02$ ;  $D_2=1.66\pm 0.02$ .

В настоящее время нами осуществляется детальный многоступенчатый анализ группирующейся сейсмичности Байкальского региона за период 1962–2012 годы, завершается декластеризация «Каталога землетрясений Прибайкалья» и формирование «Каталога групп сейсмических событий Прибайкалья» и «Каталога группирующихся землетрясений Прибайкалья». Выделены примерно 3500 групп толчков: из них около 220 и 3200 – афтершоковые и роевые последовательности, а около 60 – взрывы. На основании этих данных будут выбраны решающие функции распознавания группирующихся толчков и получены статистические оценки пространственно-временных и энергетических критериев группирования афтершоков и роевых землетрясений по разным параметрам. Установленные критерии группирования афтершоков и роевых землетрясений будут использованы для формализованной декластеризации «Каталога землетрясений Прибайкалья» при вариациях средних значений параметров на уровне двух стандартных отклонений.

Нужно понимать, что применение любой формализации для выделения группирующихся толчков переносит заложенные в алгоритмы распознавания закономерности в выделенные кластеры землетрясений и в полученной выборке заложены априори принятые распределения. В настоящее время пространственно-временные и энергетические распределения афтершоков и роевых толчков БРС изучены недостаточно полно, а это одна из основных причин, по которым формализации нельзя применять автоматически. В практике

формирования каталогов землетрясений без афтершоков часто используется программа В.Б. Смирнова, в которой реализован алгоритм Г.А. Молчана, О.Е. Дмитриевой [7]. При использовании этой программы в БРС была выделена основная часть афтершоков землетрясений с энергетическим классом  $K_p \geq 13$  [10]. В работе «Были выделены также рои землетрясений, в которых есть события с  $K_p \geq 11$ » (с. 169), что необъяснимо при использовании программы выделения афтершоков.

### **Основные результаты**

При изучении динамических параметров очагов афтершоков установлено, что коэффициент  $b$  в уравнениях корреляции среднего радиуса  $R$  дислокации и энергетического класса  $K_p$  толчков

$$\lg R \pm S = (A \pm S_a) + (b \pm S_b) K_p,$$

где  $A$  и  $b$  коэффициенты,  $S$ ,  $S_a$  и  $S_b$  – среднеквадратичные отклонения, закономерно изменяется в последовательных выборках афтершоков [4]. Это изменение происходит по-разному для коротких серий с небольшим числом толчков и для продолжительных последовательностей афтершоков. В первом случае после главного толчка наблюдается резкое уменьшение коэффициента  $b$ , что говорит о преимущественно упругом деформировании среды. При продолжительных афтершоковых сериях в течение первых нескольких суток происходит увеличение коэффициента  $b$ , а затем его уменьшение, что можно объяснить изменением соотношения упругой и пластической деформаций среды в стесненных условиях литосферы. Поскольку  $b$  характеризует длины разрывов и является мерой деформации, то одной из причин такого поведения радиусов дислокаций может быть изменение структуры и реологии среды в очаговой зоне, обусловленное основным толчком и серией сильных афтершоков. На рисунке 1 приведены графики зависимости деформации сдвига  $\varepsilon$  от времени под действием касательного напряжения  $\tau = \tau_1$  при  $0 < t < t_1$  и  $\tau = 0$  при  $t < 0$  и при  $t > t_1$  для идеально-упругого тела (а), а также для реологических тел – эластичного (б), пластичного (в) и для более сложного (г) тела [9]. Поведение коэффициента  $b$  в продолжительных афтершоковых сериях близко соответствует графику сложного реологического тела (Рис. 1, г), у которого наблюдается как упругая  $\varepsilon_1$ , так и эластичная  $\varepsilon_2$  и пластическая  $\varepsilon_3$  деформации. Объемное разрушение среды на начальном этапе длительного афтершокового процесса способствует быстрой релаксации напряжений за счет роста длин разрывов. Дальнейшая концентрация трещин в локальном объеме литосферы в стесненных условиях увеличивает эластичность и «псевдопластичность» среды, понижает эффективную вязкость и препятствует распространению разрывов. Это приводит к уменьшению длины разрывов, наиболее

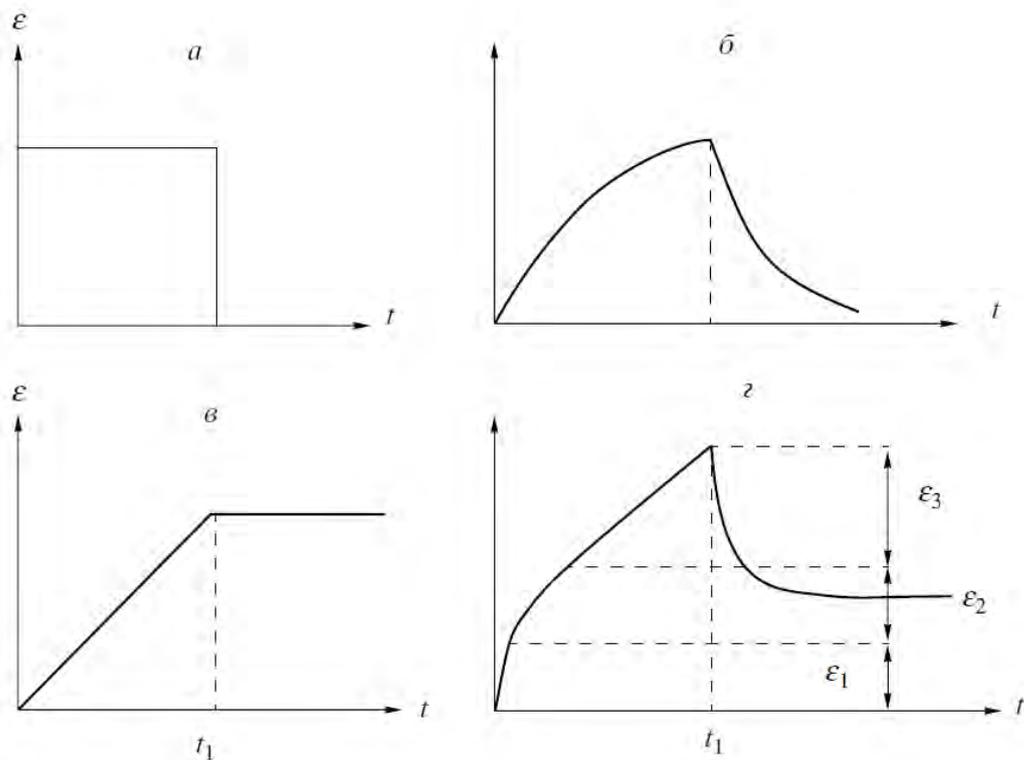


Рис. 1. График зависимости деформации  $\varepsilon$  от времени (пояснения в тексте)

значительному в диапазоне высоких энергетических классов. Такое уменьшение, зависящее от величины энергетического класса землетрясения, указывает на сложный нелинейный характер деформирования геолого-геофизической среды в начальной стадии продолжительных афтершоковых последовательностей толчков.

На рисунке 2 приведены графики вариаций среднего интервала времени  $\delta t$  между последовательными толчками в группах афтершоков различных энергетических классов, полученные для афтершоковой серии Южно-Якутского землетрясения (20.04.1989; 22-59-54.8±0.6 с;  $M_{LH}=6.6\pm 0.1$ ;  $K_p=16.5\pm 0.5$ ;  $\varphi=57.17\pm 0.05$  ° с.ш.,  $\lambda=122.31\pm 0.10$  ° в.д.). Видно, что с ростом энергетического класса интервалы времени между последовательными толчками увеличиваются. Можно предположить, что повышенные значения  $\delta t$  афтершоков с  $K_p \leq 6$  обусловлены не полной представительностью слабых толчков. На рисунке 2 видно, что первые два сильные афтершока не оказали заметного влияния на интервалы времени между толчками. Начиная с третьего афтершока 29.04.1989 г., на графиках наблюдаются четыре резких уменьшения  $\delta t$  во время сильных афтершоков, что можно интерпретировать как появление «афтершоков сильных афтершоков», и проявление каскада бифуркаций напряжения. Особенно значительно уменьшилось  $\delta t$  во время наиболее мощного афтершока 17.05.1989 года. Детальный анализ показал, что уменьшения среднего интервала времени между толчками начинаются перед сильными афтершоками [4]. Это может быть связано с

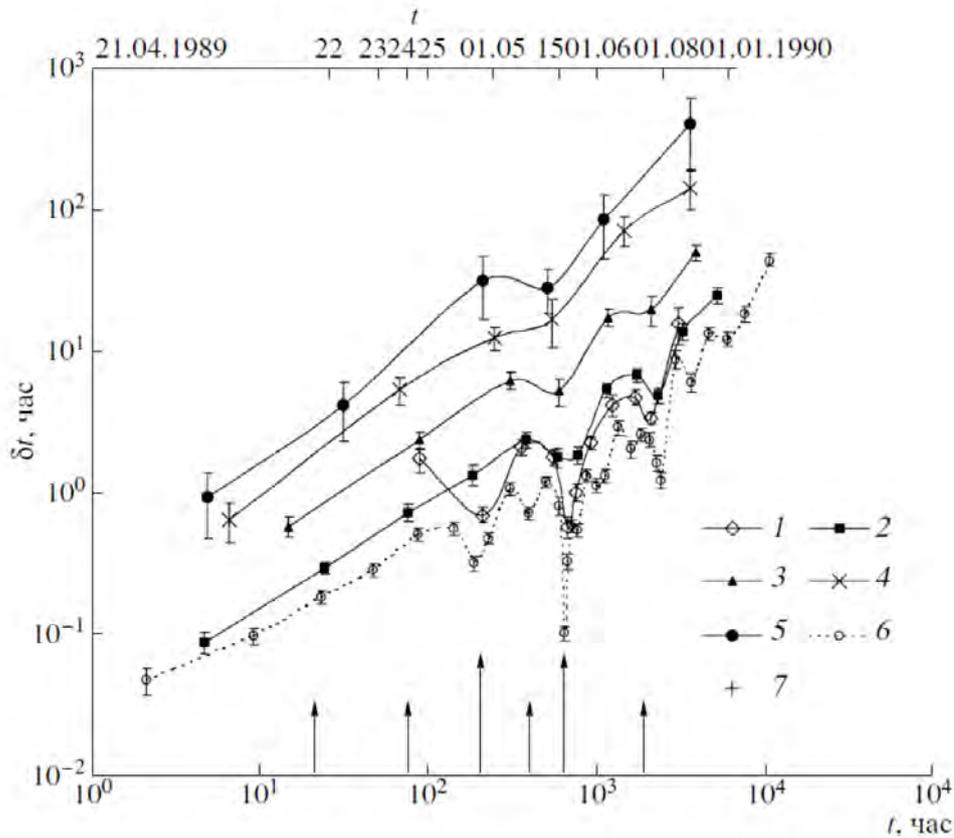


Рис. 2. Вариаций среднего интервала времени  $\delta t$  между последовательными толчками в группах афтершоков Южно-Якутского землетрясения.

1-5 – группы из 100, 100, 50, 20 и 10 афтершоков с  $K_p \leq 6$ ,  $K_p = 7$ ,  $K_p = 8$ ,  $K_p = 9$  и  $K_p \geq 10$ , соответственно; 6 – группы из 100 афтершоков полной выборки данных; 7 и стрелки – моменты времени наиболее сильных афтершоков с  $K_p \geq 12.5$ .

появлением «форшоков сильных афтершоков».

Оценки соотношения «случайной» и «фоновой» составляющих сейсмичности выполнены нами для площадки с координатами  $\varphi = 51-52^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 98-99^\circ$  в.д. (юго-западный фланг Байкальской рифтовой зоны, район Бусийнгольской впадины). Эта площадка имеет высокие показатели по группированию землетрясений (афтершоки трех бусийнгольских землетрясений 1974, 1976 и 1991 гг.) и сложную пространственно-временную структуру группирования. Всего на исследуемой территории выделено более пятидесяти групп с разным количеством толчков в кластере, каждой из которых приписаны временные пределы, координаты площадок и прочие идентификаторы [6]. В конечной «очищенной» выборке данных оказалось 1034 землетрясения («фоновая» составляющая сейсмичности), что составляет менее 15% от первоначального объема выборки (7421). Отношение «случайной» (6387) и «фоновой» (1034) составляющих сейсмичности равно  $A \approx 6.2$ , что позволяет охарактеризовать локальную активизацию среды как очень высокую, так как среднее значение активизации по Байкальскому региону равно  $A \approx 0.3$ . Анализ площадного распределения групп показал, что роевые толчки происходили почти на всей территории, как в очаговых зонах

сильных землетрясений, так и вне этих зон. В пределах площадки в разной мере постоянно присутствует режим группирования толчков. Эти результаты показывают, как велико может быть отношение «случайной» к «фоновой» сейсмичности в некоторых областях литосферы БРС. Следовательно, параметры пространственно-временной и энергетической структуры сейсмичности областей БРС будут существенно изменяться в зависимости от того, учитывается или нет «случайная» сейсмичность в ее оценках.

### **Заключение**

В последнее время проблема выделения и классификации группирующихся сейсмических событий стоит очень остро в Байкальском регионе, сейсмичность которого на четверть состоит из афтершоков и роевых толчков. Исходя из различной физической природы «фоновой» и «случайной» сейсмичности, для корректного решения многих геофизических и геодинамических задач необходимо разделять систематическую и группирующуюся сейсмичность. В статье описаны проблемы и представлены основные результаты исследования групп землетрясений и группирующейся сейсмичности в литосфере Байкальской рифтовой системы и способы декластеризации «Каталога землетрясений Прибайкалья». Полученные в результате детального многоступенчатого анализа критерии группирования афтершоков и роевых землетрясений предполагается использовать для формализованной декластеризации «Каталога землетрясений Прибайкалья» и формирования однородного полного «Каталога групп сейсмических событий Прибайкалья» и «Каталога группирующихся землетрясений Прибайкалья».

*Исследование поддержано РФФИ (проект №14-45-04011\_p\_сибирь\_a).*

### **Список литературы**

11. Гайский В. Н. Статистические исследования сейсмического режима. – М.: Наука, 1970. – 122 с.
12. Ключевская А.А., Какоурова А.А. Варианты и способы декластеризации «Каталога землетрясений Прибайкалья» // Строение литосферы и геодинамика. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2015. – С. 87–89.
13. Ключевская А.А. Совершенствование методики выделения групп землетрясений Байкальского региона // Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы. – Воронеж: ВГУ, 2013. – Вып.3. – С. 298–299.
14. Ключевский А.В. Кинематика и динамика афтершоков Южно-Якутского землетрясения // Вулканология и сейсмология. – 2005. – №4. – С.63–78.
15. Ключевский А.В., Демьянович В.М., Ключевская А.А. Группы землетрясений Байкальской рифтовой зоны: статистика и пространственно-временное распределение // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2011. – Вып.9. – С. 99–101.
16. Ключевский А.В., Демьянович В.М., Ключевская А.А., Зувев Ф.Л. Соотношение случайной и систематической составляющих сейсмичности в районе Бусийнгольской впадины на юго-западе Байкальской

***ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА***

рифтовой зоны // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2014. – С. 109.

17. Молчан Г.А., Дмитриева О.Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Вычислительная сейсмология. – 1991. – Вып. 24. – С.19–50.

18. Солоненко Н.В., Солоненко А.В. Афтершоковые последовательности и рои землетрясений в Байкальской рифтовой зоне. – Новосибирск: Наука, 1987. – 93 с.

19. Физический энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1965. – 592 с.

20. Radziminovich N.A., Ochkovskaya M.G. Identification of earthquake aftershock and swarm sequences in the Baikal rift zone // Geodynamics & Tectonophysics. – 2013. – Т. 4. – №2. – С. 169–186.

УДК 550.34

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМОМОНИТОРИНГА ПО ДАННЫМ СЕЛЕНГИНСКОЙ ЛОКАЛЬНОЙ СЕТИ

<sup>1,2</sup>Цыдыпова Л.Р., <sup>1</sup>Тубанов Ц.А., <sup>2</sup>Толочко В.В., <sup>1</sup>Базаров А.Д.

<sup>1</sup>Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, e-mail: laraMGU@yandex.ru

<sup>2</sup>Бурятский филиал ГС СО РАН, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, e-mail: gs@gin.bscnet.ru

Дается характеристика Селенгинской сейсмической сети. Показаны ее возможности при регистрации разномасштабных сейсмических событий, при исследовании глубинного строения земной коры и мантии, при изучении сейсмического шума и его динамических характеристик.

Ключевые слова: мониторинг, глубинное строение земной коры и мантии, сейсмический шум, плотность спектра

## SOME RESULTS OF SEISMIC MONITORING BASED ON THE SELENGINSKAYA LOCAL NETWORK

<sup>1,2</sup>Larisa R. Tsydyпова, <sup>1</sup>Tsyren A. Tubanov, <sup>2</sup>Vitaliy V. Tolochko, <sup>1</sup>Artem D. Bazarov

<sup>1</sup>Geological institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, 6a Sakhyanova Str., e-mail: laraMGU@yandex.ru

<sup>2</sup>Buryat department of Geophysical Survey, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, 6a Sakhyanova Str., e-mail: gs@gin.bscnet.ru

A characteristic of the Selenginskaya seismic network is given. Its potential capabilities for registration of different seismic events, for studying of the deep structure of the Earth's crust and mantle, for examining seismic noise and its dynamic characteristics are presented.

Key words: monitoring, deep structure of the Earth's crust and mantle, seismic noise, density spectrum

### Введение

Район Центрального Байкала является наиболее сейсмоактивным в Байкальской рифтовой зоне. За последние 150 лет здесь произошло пять катастрофических землетрясений, в том числе Цаганское (12.01.1862,  $M=7.5$ ) и Среднебайкальское (29.08.1959,  $M=6.8$ ), которые сопровождались тектоническими движениями отрицательного знака. Оба события были локализованы в акватории оз. Байкал в районе дельты р. Селенги. В результате Цаганского землетрясения произошло опускание тектонического блока земной коры и образование залива Провал. Среднебайкальское землетрясение также сопровождалось тектоническими движениями отрицательного знака – опусканием дна оз. Байкал в эпицентральной зоне на 10–

## ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

15 м [6]. Уровень сейсмичности и проблемы сейсмической безопасности территории Западного Забайкалья предопределили создание в 1996 году Селенгинской локальной сети, основной целью которой стал сейсмический мониторинг наиболее опасных сейсмогенных структур вблизи заселенных и развитых промышленных районов Республики Бурятия. Сеть была создана совместными усилиями двух академических учреждений Геологическим институтом СО РАН и Бурятским филиалом ГС СО РАН. Сейсмический полигон расположился в координатах 51.5°–54.0° с.ш., 105.0°–109.0° в.д. и охватил центральную часть БРЗ. На рисунке 1 представлена схема расположения сейсмических станций сети.

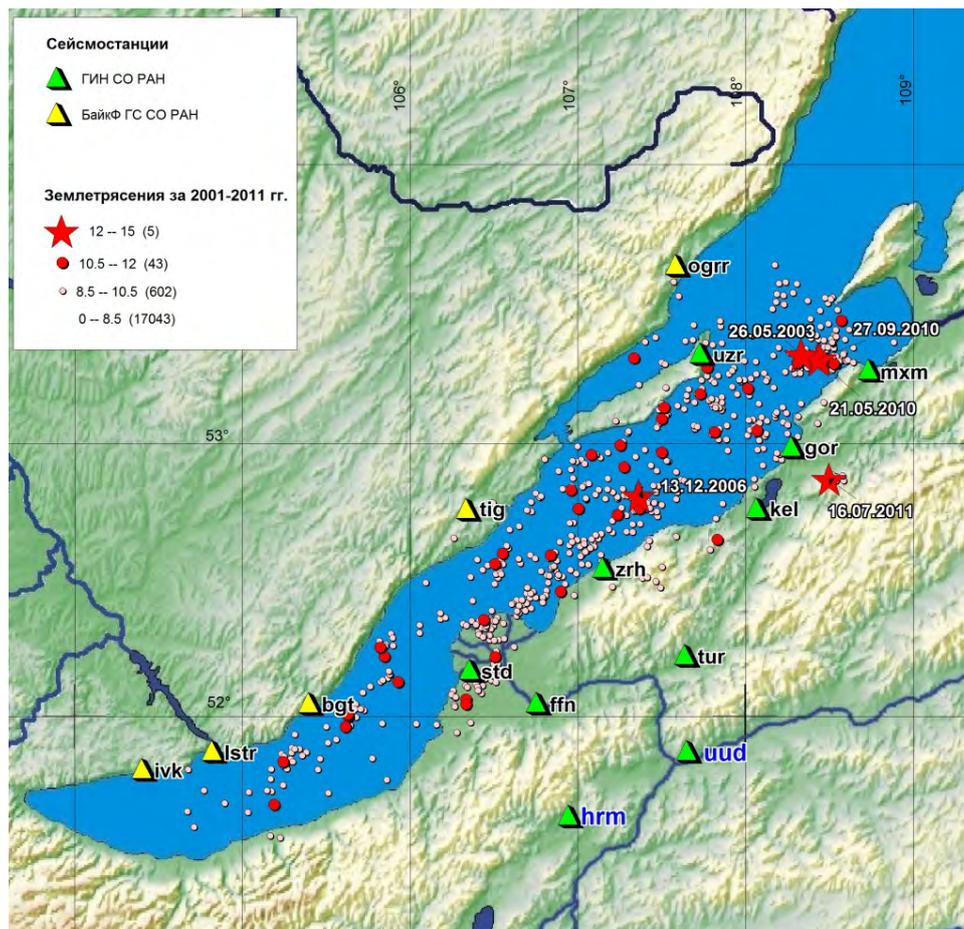


Рис. 1. Расположение станций Селенгинской сейсмической сети (зеленые значки) и очагов землетрясений за 2001-2011 гг.

Синими кодами обозначены станции «Улан-Удэ» и «Хурамша» (**uud** и **hrm**)

Целью данного исследования является представление результатов сейсмомониторинга, проводимого Селенгинской локальной сетью.

### Материал и методы исследования

Селенгинская сеть сейсмостанций структурно дополняет региональную сеть сейсмологических станций Прибайкалья. В настоящее время сейсмическая сеть состоит из 9 сейсмостанций, в том числе 4 пункта наблюдений дополнительно оснащены широкополосной

## **ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА**

аппаратурой. Сейсмостанции укомплектованы сейсморегистраторами «Байкал» и «Иркут», короткопериодными сейсмодатчиками типа СМЗКВ, СМЗ, широкополосными сенсорами СМГ40Т.

С самого начала, приоритет был отдан использованию в сети наблюдений цифровой и малообслуживаемой регистрирующей аппаратуры, функционирующей в режиме круглогодичных наблюдений. Следует отметить, что первая (в регионе Байкальской рифтовой зоны) постоянная цифровая регистрация землетрясений была начата в феврале 1996 г. на сейсмостанции «Улан-Удэ» (UUD). В течение последующих трех лет в Восточном Прибайкалье было установлено еще 6 цифровых сейсмостанций с триггерной регистрацией данных. В 2002-2003 гг. был осуществлен переход на непрерывную регистрацию данных. Это позволило расширить энергетический диапазон (в сторону низких энергетических классов, вплоть до 4.5). До этого момента нижним пределом являлся 7 энергетический класс. Начиная с 2006 года, сейсмостанции сейсмической сети укомплектовываются широкополосными сенсорами СМГ-40Т (фирма Гуралп) с регистраторами «Иркут» собственной разработки. На данный момент в сети работают 5 широкополосных станций.

По результатам обработки и интерпретации данных сейсмологических наблюдений за период с 2001 по 2011 гг. выделено более двадцати четырех тысяч землетрясений. При локализации сейсмических событий в обработке используются данные пяти станций Байкальского Филиала Геофизической Службы («Большое Голоустное/BGT», «Ивановка/IVK», «Листвянка/LST», «Онгурены/ONG», «Тырган/TIG») [1].

### **Результаты исследования и их обсуждение**

Большинству происходящих в Центральном Байкале землетрясений, присущ, как известно [4], «рифтовый» характер напряжений, при котором оси напряжений растяжения – близгоризонтальны и имеют северо-запад – юго-восточное направление, а оси напряжений сжатия – близвертикальны. Центральный Байкал входит в зону возможной интенсивности сотрясений 9 баллов и выше и характеризуется высокой сейсмической активностью. За более чем десятилетний период на рассматриваемой площади зарегистрировано порядка 15 000 землетрясений с  $Kp \geq 4.3$  [1]. Гипоцентры большинства из них располагаются в средней части земной коры в пределах глубин 10 – 22 км [7].

В Центральном Байкале ежегодно происходит в среднем порядка тысячи землетрясений различного энергетического класса (Рис. 2), большинство из которых относятся к землетрясениям умеренной интенсивности ( $Kp=6-7$ ). Вклад событий меньше 8 класса составляет порядка 85% от общего числа зарегистрированных событий, достигая в отдельные года и 90%. Это связано не только с геометрическим увеличением количества

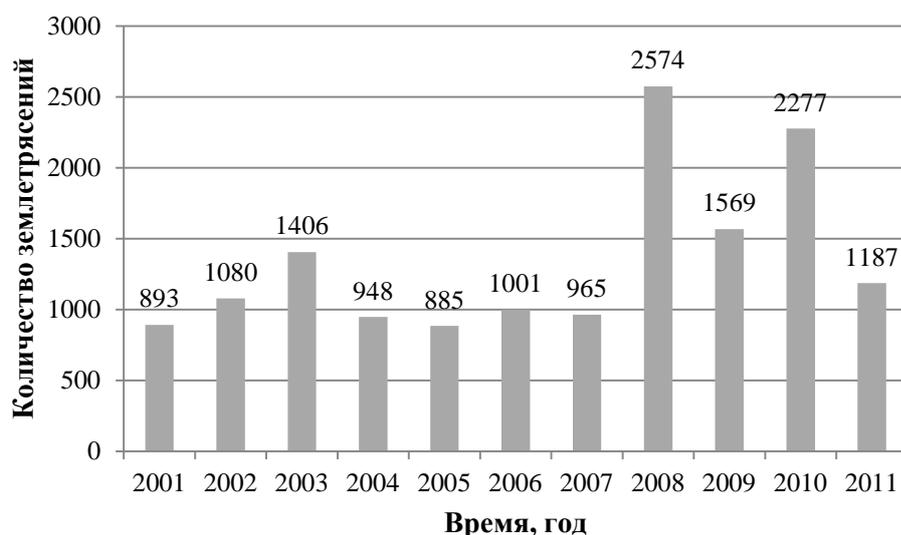


Рис. 2. Распределение количества землетрясений, построенное по данным наблюдений с 2001 по 2011 для Центрального Байкала

землетрясений с понижением энергетического класса, но и с увеличением диапазона представительности в сторону более низких классов. За десятилетний период с 2001 по 2011 год зоны регистрируемости землетрясений 5 и 6 класса увеличились вдвое, стала возможной регистрация землетрясений 4 класса. Из ряда выделяются 2008 и 2010 года с превышением порога в 2000 событий, именно в это время происходили самые сильные землетрясения 13–14 классов (например, Максимихинское землетрясение, 20.05.2008 с  $M_w=5.3$ ), и соответствующие им афтершоковые последовательности землетрясений более низкого класса.

По расчету суммарных годовых значений выделившейся энергии можно проследить вариации во времени сейсмической энергии в рассматриваемой нами области. Среднее суммарное значение выделившейся энергии в годы с умеренной сейсмической активностью составляет порядка  $10^{12}$  Дж. При возникновении достаточно сильных землетрясений годовое значение энергии увеличивается в десятки, сотни раз. В 2006–2010 гг. увеличение энергии коррелируется с региональным усилением сейсмической активности.

Локализованный характер сейсмичности Центрального Байкала наглядно демонстрирует карта плотности эпицентров землетрясений, построенная за десятилетний период инструментальных наблюдений (2001–2011 гг.) (Рис. 3). Анализ карты показывает, что области высокой концентрации эпицентров землетрясений (больше 100 событий в ячейке 8 x 8 км), приурочены к сейсмически активным разломным структурам и располагаются вдоль акватории озера Байкал вблизи восточного берега. Краевые части области характеризуются достаточно умеренной сейсмичностью 5–25 землетрясений на ячейку, а периферийные части активных областей содержат 25–100 событий.

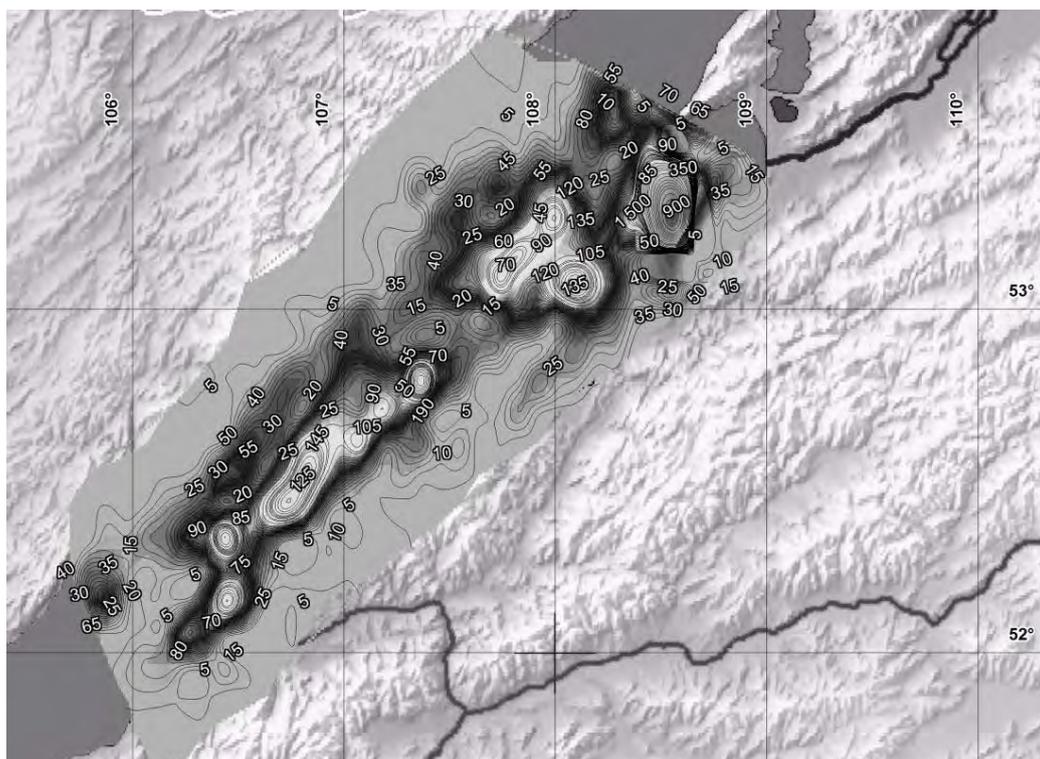


Рис. 3. Карта плотности эпицентров за период наблюдений с 2001 по 2011 гг.

График повторяемости землетрясений, характеризующий распределение количества землетрясений по энергии, показывает довольно стабильное значение коэффициента  $\gamma=0.50$ , но отличающееся от региональных показателей [2]. Это объясняется обобщенным характером оценки сейсмического потока, получаемого по данным региональной сети.

**Метод приемных функций.** Планомерная работа по расстановке широкополосных станций и накоплению непрерывных сейсмических записей позволили начать работы по исследованию глубинного строения юго-западного Забайкалья. Коллекция телсейсмических записей каждой такой станции представляет собой полноценный источник информации о скоростном строении земной коры и мантии вокруг точки наблюдения в радиусе до 200 км. Овладеть такой информацией возможно с помощью разработанных к настоящему времени структурных сейсмологических методов. В нашем исследовании мы применили хорошо зарекомендовавший себя метод приемных функций [10]. Исследование выполнялось по записям станций, установленных первыми в локальной сети и накопивших наибольшее количество данных – «Улан-Удэ» и «Хурамша» (UUD и HRM, Рис. 1). Из 3-компонентных широкополосных записей станций выделялись и анализировались волновые формы функции приемника, полученные по землетрясениям в диапазоне обратных азимутов (BAZ) от 030 до 300°. Из азимутального анализа следует, что некоторые из изначально сгруппированных нами 30-градусных диапазонов имеют подобные приемные функции, и выявляются примерные

## ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

границы, где приемные функции меняются существенным образом, что предполагает изменение скоростной структуры при переходе через эти условные границы.

Исходя из этого, Р-приемные функции по станциям были разделены на несколько азимутальных диапазонов, для каждого из которых были рассчитаны 2 вида одномерных моделей  $V_s(h)$ : модели от поверхности до глубины 70 км (Рис. 4), рассчитанные инверсией приемных функций в интервале частот 0.05–0.9 Гц, и модели от поверхности до глубины 280 км – по более низкочастотному интервалу 0.05–0.3 Гц. Из полученных моделей следует, что некоторые особенности скоростной структуры воспроизводятся в противоположных диапазонах азимутов. Наиболее контрастная «слоистость» выявляется в коре. В низах коры в противоположных азимутах выявляется понижение сейсмической скорости, что может указывать на условия сжатия в этих районах в условиях коллизии [3].

Скоростное распределение мантии в моделях для «Хурамши» и «Улан-Удэ», наиболее низкими скоростями свидетельствует о возможных расплавах в интервале глубин от 200 до 100 км. От земной коры этот низкоскоростной слой отделен нормальными и даже несколько повышенными скоростями. Подстилается слой аномально низкой скорости нормальной мантией. Полученный результат подтверждает результаты сейсмической томографии на продольных волнах, выполненной по субмеридиональному профилю PASSCAL [5].

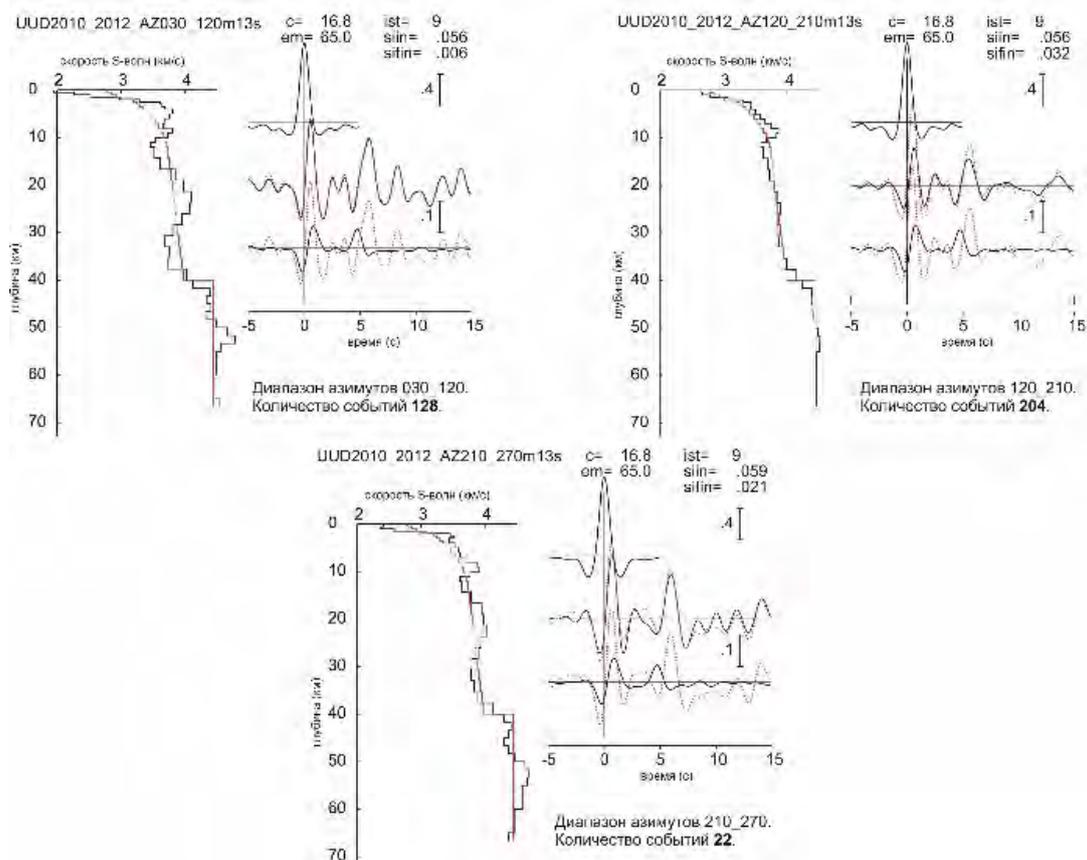


Рис. 4.  $V_s$  модели до 70 км по данным сейсмостанции UUD

**Изучение динамических характеристик сейсмического шума по данным цифровых станций Селенгинской локальной сети.** Впервые дана сравнительная оценка характеристик сейсмического шума для станций Селенгинской локальной сети. По каждой из трех компонент сейсмического шума рассчитаны спектральные кривые плотности, изучены временные вариации. Основной целью исследования являлось сравнительное изучение спектральных характеристик и временных вариаций различных частотных составляющих микросейсмического фона на 4 сейсмических станциях Селенгинской локальной сети – «Заречье» (ZRH), «Узур» (UZR), «Улан-Удэ» (UUD), «Хурамша» (HRM).

Сейсмические записи отбирались с учетом отсутствия на сейсмограмме импульсных сигналов и шумов от техногенных помех, и сейсмических волн землетрясений и взрывов. Для отбора таких записей был разработан следующий алгоритм: из записей выбирались участки без сейсмических событий длиной по 10 минут каждый с минимальным разбросом по амплитудам в сутках. Было отобрано примерно по 150 таких отрезков для каждой станции по каждому сезону. Для изучения параметров сейсмического шума использованы записи станций за 2012 год.

Спектральная плотность сейсмического шума рассчитывалась для каждой станции, для каждой из трех компонент сейсмических записей, отдельно для ночного (15:00–19:00 GMT, 00:00–04:00 по местному времени) и дневного времени (01:00–10:00 GMT, 10:00–19:00 по местному времени) по сезонам. После получения для станций набора спектров, оценивался медианный спектр, который принимался за наиболее вероятный спектр сейсмического шума для данной выборки.

На рисунке 5 изображены медианные спектры для дневного и ночного времени по Z компоненте по всем четырем сейсмостанциям за весенний период в диапазоне частот от 1 до 25 Гц. Следует отметить, что ночные спектры отличаются более низким уровнем шумов, чем дневные на графиках по сейсмостанциям «Улан-Удэ», «Хурамша» и «Заречье» и почти не различаются на сейсмостанции «Узур». Уровень шумов в рассматриваемой области частот приближен к верхнему уровню модели Петерсона [9], и в среднем выдержан по вертикали.

На «Заречье» характер хода спектра мощности выделяется общим повышением уровня спектральной плотности шума на 1-2 порядка в сравнении с остальными сейсмостанциями.

Сравнение вариаций шумов между станциями по каждому из сезонов показало, что в зависимости от времени года характер спектральных кривых меняется произвольным образом. Однако можно выделить несколько особенностей: 1. осенний период в низкочастотной области до 2 Гц имеет максимальные значения спектра мощности, и в целом, продолжает эту тенденцию, оставаясь на уровне или выше по сравнению с другими сезонами. Однако этого

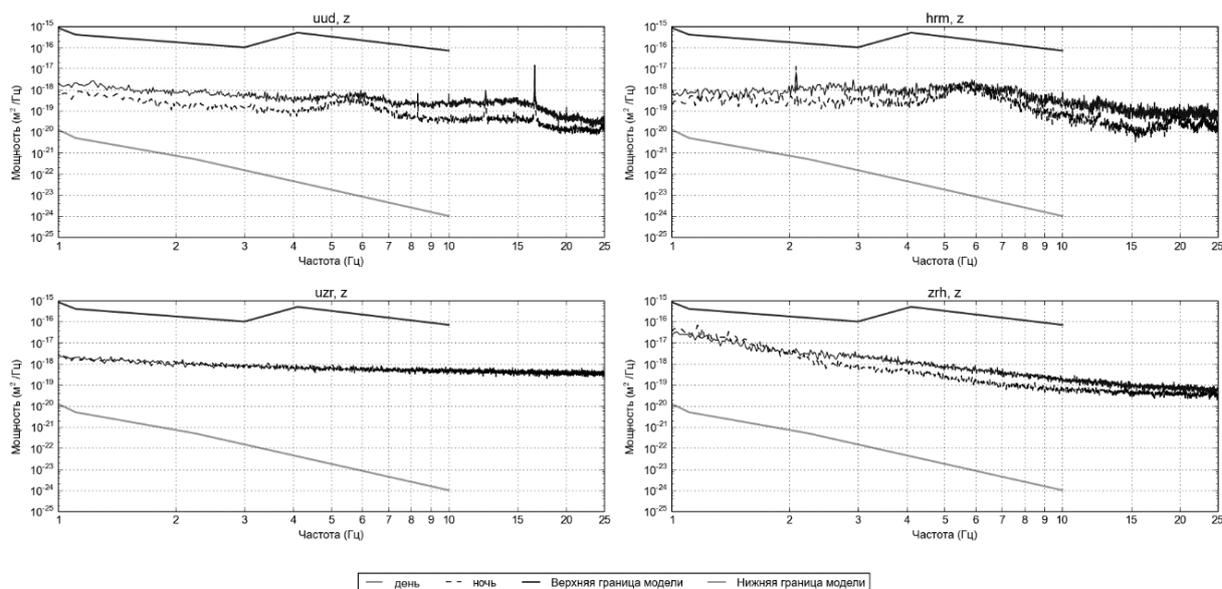


Рис. 5. Медианные спектры шума для дня и ночи за весенний период.

Модель Петерсона: 1 – верхняя граница, 2 – нижняя граница

нельзя сказать о сейсмостанции «Хурамша», где кривая спектра мощности (осень), начиная с 7 Гц имеет уже минимальные значения; 2. Сейсмостанции «Узур», «Заречье», «Улан-Удэ», начиная с 2, 4 и 5 Гц соответственно, в целом не различаются по сезонам, разброс значений минимален; 3. Самым спокойным сезоном относительно микросейсм являются зима на сейсмостанциях «Улан-Удэ» и «Заречье» и весна на «Узуре».

### Список литературы

1. Байкальский филиал Геофизической службы СО РАН [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.seis-bykl.ru>.
2. Землетрясения Северной Евразии / Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 185–195.
3. Лобковский Л.И. Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. М.: Наука, 1988.
4. Мельникова В.И., Тубанов Ц.А., Добрынина А.А., Радзиминович Н.А., Гилёва Н.А. Характер напряженно-деформированного состояния земной коры в районе дельты р. Селенги (Центральный Байкал) // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Второй международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН, 2007. – С. 145–148.
5. Мордвинова В.В., Винник Л.П., Косарев Г.Л., Орешин С.И., Треусов А.В. Телесеismicкая томография литосферы Байкальского рифта // Докл. РАН. 2000. – Т. 372. – № 2. – С. 248–252.
6. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Под ред. Н.В. Кондорской, Н.В. Шебалина. – М.: Наука, 1977. – 535 с.
7. Суворов В.Д., Тубанов Ц.А. Распределение очагов близких землетрясений в земной коре под Центральным Байкалом // Геология и геофизика, 2008. – Т. 49. – №8. – С. 805–819.

***ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА***

8. Цыдыпова Л.Р., Тубанов Ц.А., Предеин П.А., Санжиева Д.П.-Д. Селенгинская сеть сейсмологических и вибросейсмических наблюдений // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Восьмой Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН. – 2013. – С. 342–345.
9. Peterson J. Observation and Modeling of Seismic Background Noise. – Albuquerque, New Mexico, 1993. – 42 p.
10. Vinnik L.P. Detection of P to SV in the mantle // Phys. Earth planet, 1977. – Int. 15. – P. 39-45.

**ГРАФИКИ ПОВТОРЯЕМОСТИ СЛАБЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ВБЛИЗИ  
БУРЕЙСКОЙ ГЭС ДО И ПОСЛЕ НАПОЛНЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩА**

**<sup>1</sup>Харитонов М.Е., <sup>1</sup>Колотова Л.Г., <sup>2</sup>Рябинкин К.С.**

*<sup>1</sup>Бурейская ГЭС, геодинамический полигон, п. Талакан, Россия E-mail:  
KharitonovME@burgess.rushydro.ru*

*<sup>2</sup>Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН. 680000 Хабаровск, ул.  
Ким Ю Чена, 65*

Рассматривается сейсмичность вблизи Бурейской ГЭС. Результаты моделирования динамики сейсмической активности в различных интервалах энергий землетрясений юго-западного сегмента разломной зоны Тан Лу проанализированы по графикам повторяемости землетрясений. По статистике количества землетрясений в двух фазах состояния геологической среды до и после наполнения водохранилища показано существенное различие в частоте землетрясений. Установлено, что на основе баланса энергии, различие в графиках повторяемости может быть следствием региональных причин тектонического характера либо периодических миграционных процессов сейсмической активности.

Ключевые слова: график повторяемости землетрясений, наведенная сейсмичность, Бурейская ГЭС, Амурская плита.

**RECURRENCE PLOTS FOR WEAK EARTHQUAKES OCCURRED CLOSE TO THE  
BUREYSKAYA HPP BEFORE AND AFTER RESERVOIR FILLING**

**Mikhail E. Haritonov, <sup>1</sup>Lyudmila G. Kolotova and <sup>2</sup>Konstantin S. Ryabinkin**

*<sup>1</sup>Bureyskaya HPP, geodynamic polygon, Talakan Settlement, Russia*

*<sup>2</sup>Yu.A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of  
Sciences, 65, Kim Yu Chen St., Khabarovsk, 680000, Russia*

The seismicity events are considered that occurred in close proximity to the Bureyskaya Hydro Power Plant (HPP). Using earthquake recurrence plots, we have analyzed the results of modeling dynamics of seismicity accounting for different ranges of energy released by earthquakes occurred in the southwestern segment of the Tan-Lu fault zone. Based on the statistics on the number of earthquakes occurred in two phases of the state of the geological medium before and after reservoir filling, it is shown a significant difference in the frequency of earthquake occurrence. It has been established, in terms of energy balance, that the difference in the earthquake recurrence plots may be due to regional tectonic causes or periodic seismicity migration processes.

Key words: earthquake recurrence plot, induced seismicity, Bureyskaya HPP, Amur plate.

## **Введение**

Территория, на которой проводится сейсмологический мониторинг района расположения Бурейского гидроузла, ограничена следующими географическими границами: (48-52)<sup>о</sup> СШ и (128-132)<sup>о</sup> ВД. К настоящему времени территория изучена различными масштабами геолого-геофизических работ. Кроме этого выполнены дополнительные исследования в рамках СНиП и ОСР – 98, позволившие уточнить сейсмическое микрорайонирование, а также возможные очаги землетрясений, их характеристики, вероятные максимальные воздействия на гидросооружение.

С точки зрения современной сеймотектоники плотина и водохранилище Бурейской ГЭС расположены в границах Чжангуанцайлин -Туранского плутоногенного комплекса, который представляет собой уникальный в своем роде гранитоидный пояс, простирающийся в меридиональном направлении на 1000 км при ширине 200-250 км, с западными ответвлениями на севере и юге. Преобладающими в его составе являются пермские гранитоиды, в отдельных частях присутствуют триасовые гранитоиды и вулканиты. Границами этого комплекса являются разломы: Западно-Туранский и Муданьцзянский на западе и Тастахский, Куканский, Дахэджэн и Арсеньевский - на востоке. Серией долгоживущих разломов северо-восточного простирания этот комплекс может быть разделен на ряд массивов (Буреинский, Хинганский, Цзямусы и Ханкайский), отличающихся соотношением пермско-триасовых и более древних гранитоидных комплексов, а также составом и возрастом допермских стратифицированных образований, установленных в отдельных (иногда достаточно крупных) блоках и провесах кровли [1].

Сейсмологический мониторинг вблизи гидротехнических сооружений показывает, что динамика работы плотины однозначно меняет природный сейсмический режим. Например, в работе [2] установлено, что наибольшая сейсмическая активность в Самарской области наблюдается в районе Жигулевской ГЭС, где в течение ряда лет отмечался ежегодный прирост сейсмических событий на 70%.

Изменения в геологической среде, вызванные образованием водохранилища, проявляются на значительных расстояниях от плотины [3], вызывая изменение геодинамической обстановки в регионе. Одним из факторов проявления данных изменений является наведенная сейсмичность.

Многочисленными исследованиями по Асуанской плотине, в Индии и Китае [5-8] установлено, что сейсмический режим вблизи платины зависит от гидрологического режима, режима наполнения и сброса воды, высоты плотины. Собственно, обозначенные задачи и послужили основанием для данного исследования.

## ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

Для анализа сейсмичности указанного района используются данные локальной сейсмосети Бурейской ГЭС (Рис.1). Для уточнения локации очагов землетрясений привлекаются материалы региональных сейсмостанций «Хабаровск», «Бикин», «Ванино», «Горный», «Чегдомын» и «Кульдур». Для сильных землетрясений проводится сравнение с данными ближайших к району филиалов ГС РАН (Сахалинской ОМСП, Якутской ОМСП, Байкальского филиала ГС РАН) и Китайского сейсмологического Бюро.

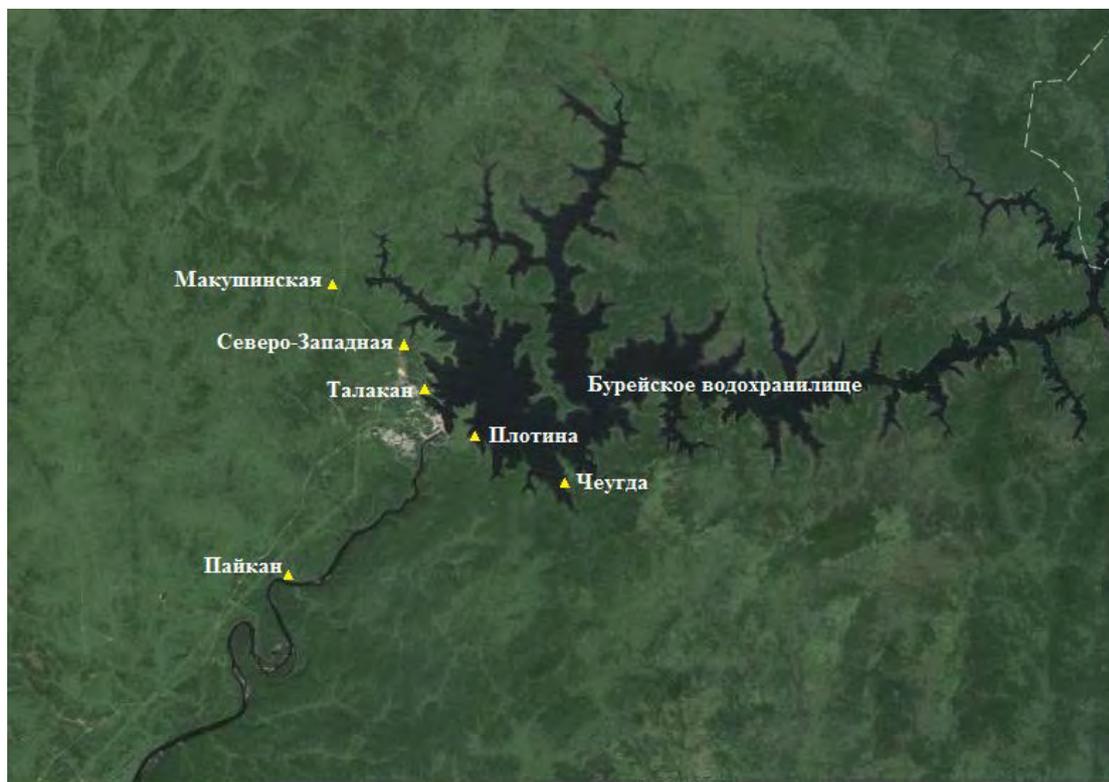


Рис. 1. Схема размещения сейсмостанций локальной сети Бурейской ГЭС.

На станциях локальной сейсмологической сети Бурейской ГЭС установлены цифровые регистраторы с непрерывной записью типа REF ТЕК-130, укомплектованные короткопериодными сейсмоприемниками GS-1. Благодаря микросейсмическим показателям станций Бурейского гидроузла в зоне границы местных землетрясений (до 100 км от центра сети) удастся устойчиво фиксировать землетрясения 5 – 6 класса. В зоне локальных (до 240 км) – 6-7 класс землетрясений. Необходимо отметить, что эти показатели меняются в указанных пределах от состояния уровня микросейсм, амплитуда которых зависит в основном от работы гидроагрегатов.

Анализ сейсмичности проводился на основе всей выборки локальной зоны мониторинга. Учитывая опыт аналогичных исследований площадка для детальных сейсмологических исследований, была определена в координатах, в соответствии с рисунком 2, в среднем в радиусе  $R < 70$  км.

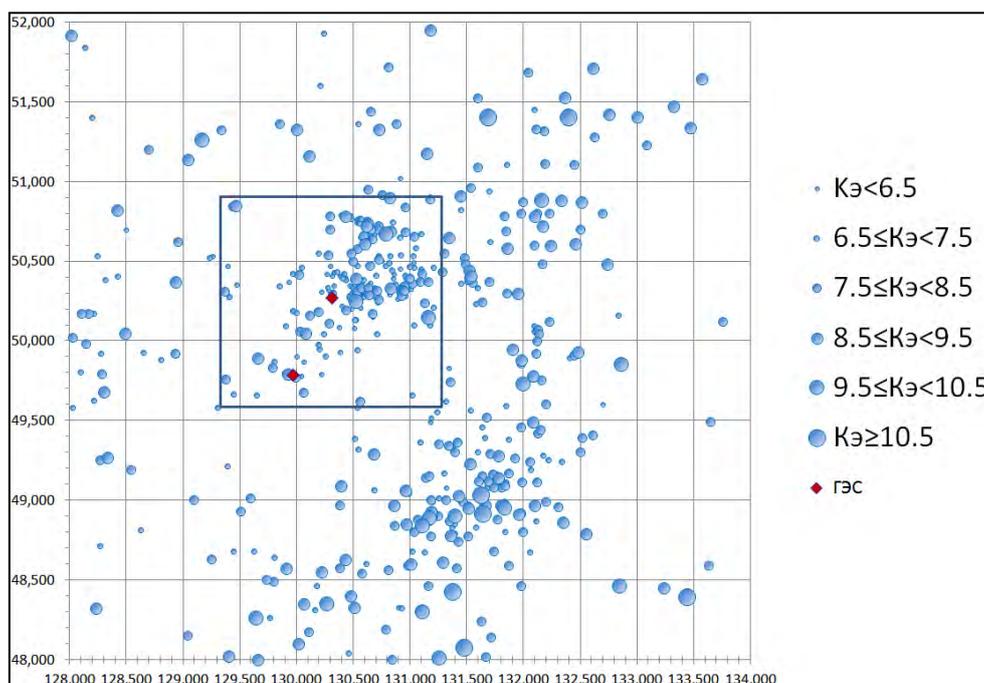


Рис. 2. Распределение эпицентров землетрясений вблизи Бурейской ГЭС с октября 2005 г. по апрель 2015 г.

Квадратом выделены сейсмические события в пределах Турано-Бурейской структуры. Ромбами показано расположение плотин Бурейской и Нижнебурейской ГЭС.

### Результаты экспериментальных наблюдений

Район Бурейской ГЭС характеризуется индивидуальной сейсмичностью, которая по площади представляет собой клинообразную вытянутую форму северо-восточного направления от плотины (Рис. 2) с достаточно плотной очаговой структурой, получившей название Турано-Бурейской (ТБС). Структура приурочена Западно-Туранскому, Туранскому и Бурейскому глубинным разломам 1-го порядка [1]. Основные очаги этой структуры расположены к востоку – северо-востоку от основных гидротехнических сооружений Бурейской и Нижнебурейской ГЭС.

В данной работе для анализа динамики сейсмического процесса использован статистический метод сравнения частот землетрясений по различным энергетическим классам землетрясений  $K=LgE$ , где  $E$  в Дж, на основе графиков повторяемости. Графики повторяемости построены за период 1975-2005г.г. (до наполнения водохранилища) на основе всех имеющихся данных по землетрясениям на площади, ограниченной указанными выше координатами наблюдений (48-52°СШ, 128-134°ВД) и за период эксплуатации плотины Бурейской ГЭС для квадрата ТБС (Рис. 3). На рисунке 3 данные по всей площади (маркеры в виде квадратов) аппроксимированы прямой  $LgN=-0.426K+4.742$ , по площади ТБС (маркеры в виде ромбов) - прямой  $LgN=-0.728K+7.522$ . Данные по всей площади нормированы к данным ТБС по времени и площади.

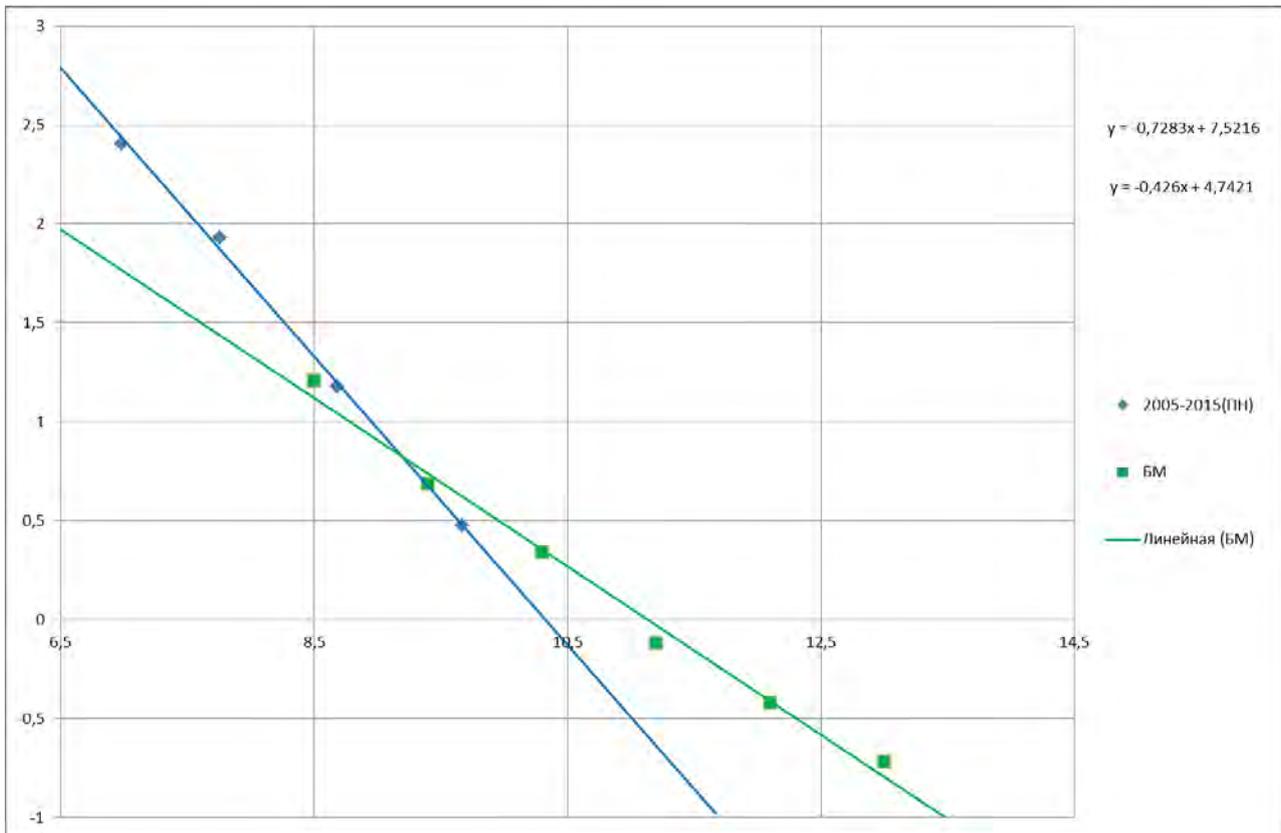


Рис. 3. Графики повторяемости до и после заполнения водохранилища за  $\Delta T=9.5$  лет

Вертикальная ось – логарифм количества землетрясений, горизонтальная – энергетический класс землетрясений. Разъяснения в тексте.

По представленным графикам можно сделать вероятностную оценку максимально возможного местного землетрясения для ТБС в любом интервале времени

#### Анализ результатов сейсмологических наблюдений и выводы

Исходя из графика повторяемости землетрясений ТБС за 2005-2015 гг. максимальное расчетное значение энергетического класса в пределах гидроузла, на данный период, следует ожидать не более  $K=10.3$ , что соответствует магнитуде  $M=3.5$ . Если аппроксимировать данный график на значения ОСР-97(С), то ожидаемое землетрясение с вероятностью 0.19% может произойти с магнитудой  $M=5.8$ . Эпицентральное расстояние до ближайшей очаговой зоны составляет порядка 10 км. Таким образом, максимально расчетное землетрясение (МРЗ) из этого очага может вызвать сотрясения, рассчитанные по формуле Шабалина Н.А., в первом случае ( $\Delta T=9.5$  лет) – 5 баллов на грунтах второй категории, в зоне жилого массива и 4 балла в зоне основных сооружений. Во втором случае (вероятность 0.19%) - 8 и 7 баллов, соответственно. Остальные очаговые зоны ТБС удалены и поэтому менее опасны по МРЗ.

Наклон графиков повторяемости указывает на то, что сейсмичность в головной части водохранилища после заполнения отличается от сейсмичности, установленной до его заполнения. Качественный анализ показывает также, что за 10 лет работы ГЭС произошло

перераспределение количества землетрясений в область низкоэнергетических классов. На первый взгляд, это может свидетельствовать о техногенном влиянии водохранилища на природную сейсмичность.

С другой стороны, в количественном отношении, число землетрясений с энергетическим классом (в статистическом смысле)  $K=6.5$  увеличилось в 10 раз (100 и 1000 событий), а с  $K=8$  - в два раза (25 и 50 событий) (Рис. 3). То есть, средний избыток энергии составит (по правилу Лейбница)  $\Delta E_{cp} = (25 \cdot 10^8 + 900 \cdot 10^6) / 2 = 10^9 \cdot (2.5 + 0.9) / 2 = 1.7 \cdot 10^9$  Дж. Если проинтегрировать по всей области от  $K=6.5$  до  $K=9$ , то получим значение  $\Delta E_{cp} \approx 10^{10}$  Дж. Можно заключить, что за время наблюдений наметился недостаток энергии сейсмических событий с  $K > 10$  (одно событие). В течение 2014 года было зарегистрировано пять местных землетрясений за пределами ТБС  $K=(9.13, 9.21, 9.11, 9.32, 9.29)$  общей энергией  $10^{9.8}$  Дж. В пределах ТБС выделившаяся энергия сейсмических событий с  $K=9$  составила  $10^{9.6}$  Дж. Это означает, что на энергетическом уровне баланс между землетрясениями с  $K < 9$  и  $K > 9$  (видимая точка пересечения графиков (Рис. 3) сохраняется.

Этот факт перераспределения энергии в область низкоэнергетических классов с сохранением общего баланса энергии может свидетельствовать о реструктуризации геологической среды в начальный этап работы плотины. Моделью данных процессов может быть гидратация межблоковых зон массивов горных пород вблизи БГЭС с уменьшением коэффициента сцепления блоков. Длительность данных процессов детально не исследовалась.

Метод анализа распределения количества землетрясений в виде графиков повторяемости очень чувствителен как временному интервалу, так и к пространственной области моделирования. Например, выявленные тенденции могут быть отражением региональных геологических процессов [3], вследствие медленных миграций сейсмической активности [9], под действием деформационных волн [10], изменению графика повторяемости в период подготовки сильного землетрясения [4].

Все эти вопросы являются предметом дальнейших исследований, актуальность которых представляет несомненную научную и практическую значимость в вопросах сейсмической безопасности промышленного региона.

### **Благодарности**

Авторы выражают благодарность С.В. Трофименко за полезные советы и обсуждение результатов моделирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания №5.1771.2014/К Министерства образования и науки России

**Список литературы**

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации м-ба 1:1 000 000. (третье поколение). Дальневосточная серия. М.: ВСЕГЕИ. 2012.
2. Симак С.В., Шумакова Е.М. Гидрологические аспекты безопасности Жигулевской ГЭС и примыкающих к ней территорий //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. № 1-9. С. 2255-2260.
3. Трофименко С.В. Тектоническая интерпретация статистической модели распределений азимутов аномалий гравимагнитных полей Алданского щита // Тихоокеанская геология. 2010. Т. 29. № 3. С. 64–77.
4. Трофименко С.В. Суточные и годовые циклы сейсмической активности сейсмических поясов Северо-Востока Азии в модели блокового строения земной коры // Вестник СВФУ. 2011. Т. 8. № 1. С. 55-63.
5. Gahalaut K., Gahalaut V.K., Pandey M.R. A new case of reservoir triggered seismicity: Govind Ballav Pant reservoir (Rihand dam), central India //Tectonophysics, Volume 439, Issues 1–4, 20 July 2007, Pages 171-178.
6. Haggag H.M., Bhattacharya Pankaj M., Kamal S., Kayal J.R. Seismicity and 3D velocity structure in the Aswan Reservoir Lake area, Egypt //Tectonophysics, Volume 476, Issues 3–4, 25 October 2009, Pages 450-459.
7. Kusala Rajendran, N. Thulasiraman, K. Sreekumari. Microearthquake activity near the Idukki Reservoir, south India: A rare example of renewed triggered seismicity //Engineering Geology, Volume 153, 8 February 2013, Pages 45-52
8. Li Fangquan, Zhang Bochong. Possibility of reservoir induced seismicity around three gorges dam on Yangtze river //International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 34, Issues 3–4, April–June 1997, Pages 76.e1-76.e8.
9. Trofimenko S.V., Bykov V.G., Merkulova T.V. Seismicity migration in the zone of convergent interaction between the Amur plate and the Eurasian plate // Journal of Volcanology and Seismology, 2015, Vol. 9, No. 3, pp. 210-222. DOI: 10.1134/S0742046315030069.
10. Trofimenko S. V., Bykov V.G. The model of crustal block movement in the South Yakutia geodynamic testing area based on GPS data // Russian Journal of Pacific Geology. 2014. Vol. 8. № 4. pp. 247-255. DOI: 10.1134/S1819714014040071.

УДК 550.371 (571.65)

## **ПРИРОДА СЕЙСМИЧНОСТИ ВОСТОЧНОЙ ЧУКОТКИ И ПРИЛЕГАЮЩЕГО ШЕЛЬФА**

**<sup>1</sup>Курткин С.В., <sup>1,2</sup>Седов Б.М., <sup>3</sup>Мяки К.Д.**

<sup>1</sup> *Магаданский филиал Геофизической Службы РАН, г. Магадан 685000, ул. Скуридина 6 б, e-mail: kurs@memsd.ru,*

<sup>2</sup> *Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, г. Магадан 685000, ул. Портовая 16, e-mail: sedov@neisri.ru*

<sup>3</sup> *Университет штата Мичиган (Ист-Лансинг), США*

Восточная Чукотка и прилегающий шельф Берингового и Чукотского морей характеризуются более высокой сейсмичностью по сравнению с соседними территориями северо-востока Азии и западной Аляски. До конца XX в. о природе сейсмичности не было каких-либо представлений, прежде всего, из-за отсутствия специальных исследований природы землетрясений. Началом изучения сейсмотектоники Чукотского п-ова и прилегающего шельфа является проведение ГСЗ по профилю Алеутская дуга - Берингов пролив, когда были поставлены несколько цифровых станций на Чукотском п-ове. В результате были получены первые представления о сейсмотектонике и геодинамике этого региона. В первом десятилетии XXI в. российскими и американскими геофизиками были проведены специальные полевые исследования, данные которых совместно с материалами региональных геофизических съемок и космоснимков позволили выяснить природу сейсмичности, которая обусловлена развитием рифтогенной области растяжения и вероятно, постгляциальным изостатическим выравниванием поверхности после таяния покровного льда.

Ключевые слова: сейсмичность, рифт, геодинамика, Чукотка, Аляска, шельф

## **NATURE ON SEISMICITY IN EASTERN CHUKOTKA AND NEIGHBORING SHELF**

**<sup>1</sup>Sergey V. Kurtkin, <sup>1,2</sup>Boris M. Sedov, <sup>3</sup>Kevin G. Mackey**

<sup>1</sup> *Magadan branch of Geophysical Survey of RAS, Magadan, 6b Skouridina Str., e-mail: kurs@memsd.ru,*

<sup>2</sup> *North-East Interdisciplinary Science Research Institute n. a. N. A. Shilo, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Magadan, 16 Portovaya Str., e-mail: sedov@neisri.ru*

<sup>3</sup> *Michigan State University, East Lansing, USA*

Seismicity in Eastern Chukotka and neighboring shelf of Bering and Chukchi Seas is defined by higher activity in comparison with territories of North-East Asia and Western Alaska. Until 20<sup>th</sup> century, there was no any conception of seismicity origin due to the absence of the earthquakes' nature researches. The beginning of the Chukotka seismotectonics and the neighboring shelf studying was initiate by deep seismic sounding of profile the

Aleutian bow – Bering channel, after few temporal digital stations were placed on Chukchi Peninsula. As a result, concept of seismotectonics and geodynamics of given region's seismicity was obtained. During the first decade of 21<sup>st</sup> century Russian and American geophysicists have held special field researches. The obtained data as well as the result of regional geophysical and cosmic survey allowed to clarify the origin of seismicity, which is due to the evolution of the rift dilatation zone, and probably, post-glaciation isostatic flattening of the surface after melting of ice.

Keywords: seismicity, rift, geodynamic, shelf, Chukotka, Alaska

## **Введение**

Первые данные о природе сейсмичности восточной Чукотки были получены при комплексной интерпретацией материалах морского ГСЗ-ОГТ, проведенного в 1994г. по профилю Алеутские острова - Берингов пролив - Канадская котловина. В пос. Провиденция и Лаврентия, а также на западной Аляске работали временные цифровые сейсмостанции, которые использовались для наблюдений по методу широкого угла, позволившего определить скорости в земной коре, исследовать её структуру и идентифицировать по преломленным волнам поверхности Конрада и Мохоровичича. Этими станциями был зарегистрирован ряд местных землетрясений. В этих международных исследованиях участвовали и учёные СВКНИИ [10]. Используя телесеизмические данные о сильных землетрясениях северо-восточной Азии, а также вновь полученные материалы, впервые сейсмичность Чукотского полуострова была рассмотрена с позиции тектоники плит [9].

В декабре 2002г. вблизи пос. Нешкан, расположенного на побережье Чукотского моря, произошло сильное землетрясение, сопровождавшееся многочисленными ощутимыми афтершоками. Их количество в отдельные дни превышало 5 ощутимых событий, при нескольких десятках слабых афтершоков, фиксирувавшихся инструментально. По заданию МЧС Чукотского автономного округа в следующем году были проведены детальные полевые сейсмологические исследования в эпицентральной зоне главного землетрясения. Одновременно временной локальной сетью цифровых сейсмостанций велась регистрация продолжавшихся афтершоков

Более чем десятилетний период исследований (1994-2006гг), позволил установить природу землетрясений, их тектоническую позицию. При этом использовались новые материалы, в частности данные космической съёмки и грави-магнитных полей на суше и акваториях, где по существу они являются единственными носителями информации о верхней структуре Земли [2]. Результаты исследований были заверены полевыми работами на наиболее интересных и ключевых участках, среди которых в частности к ним отнесены, впервые выделенные достоверно сейсмоактивные разломы, к которым приурочены наиболее сильные землетрясения (Рис. 1).

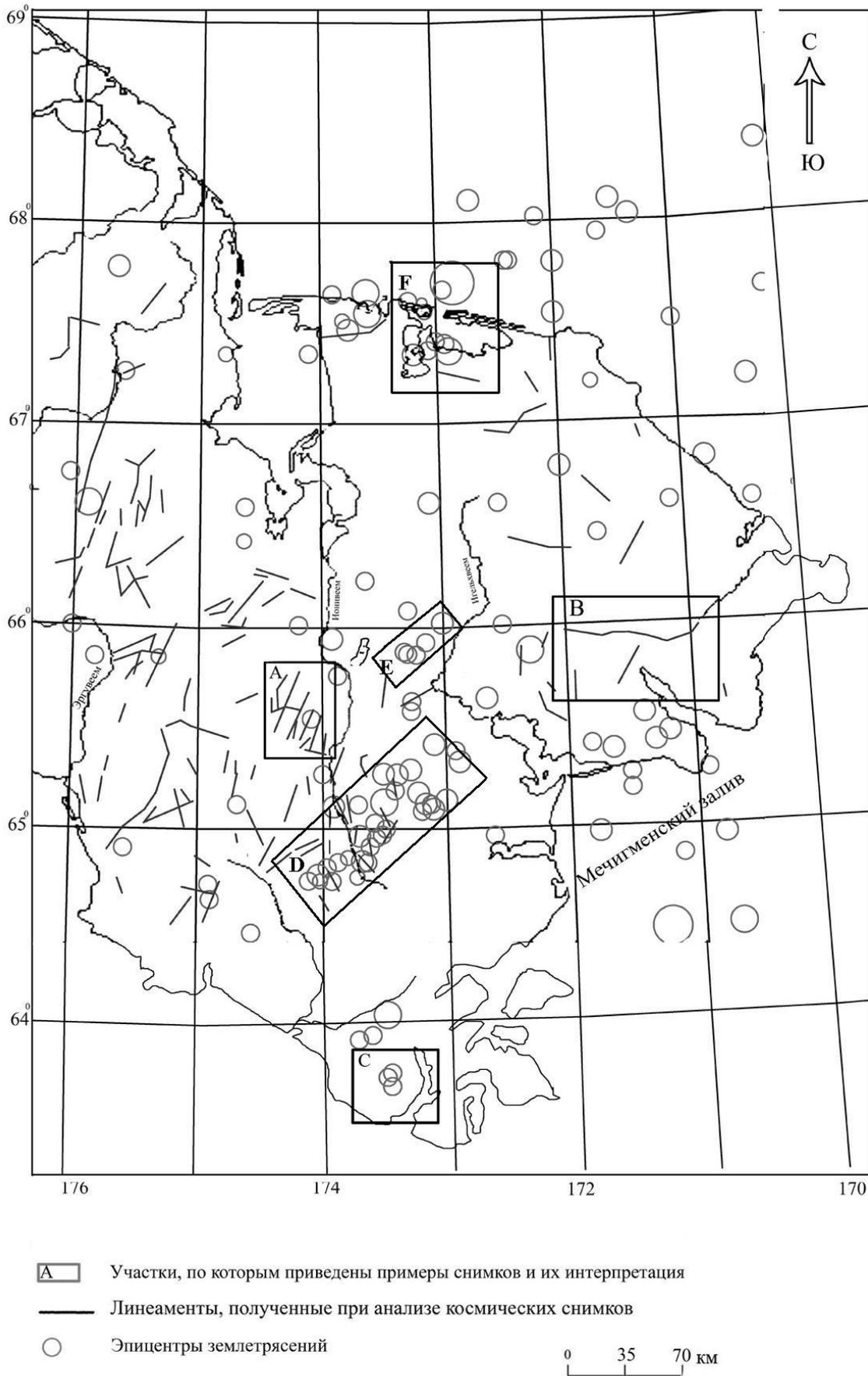


Рис. 1. Схема линеаментов и положение эпицентров землетрясений

### **Геодинамика и сейсмичность**

История тектонического развития Чукотского полуострова и прилегающего шельфа морей восстановлены, начиная с раннего докембрия (более 2,6 млрд. лет). Для понимания современной тектоники ограничимся палеотектонической реконструкцией для периода с плиоцена (4 млн. лет) по настоящее время (0 лет). В этот период продолжается развитие окраинно-континентальных дуг и субдукционных зон, обрамляющих с северо-запада и севера Тихий океан. Одновременно в задуговых бассейнах, происходило накопление осадков. Североазиатская континентальная дуга оставалась активной. Частями этой дуги являлись Восточно-Японский вулканно-плутонический пояс, Курильская дуга, Центрально - Камчатский вулканический и осадочные бассейны и Восточно-Камчатский вулканический пояс. Связанная с дугой зона субдукции образовала Курило-Камчатский террейн, отделенный от Тихоокеанской плиты Кенкельдинским меганадвигом. Примечательным структурным элементом северо-западной пачифики является ортогональное сочленение Камчатской и Алеутско-Врангелевской дуг. В Ледовитом океане продолжалось рифтообразование вдоль хребта Гаккеля. Последний разграничивает плиты Северной Америки и Евразии.

Начинает развиваться Берингоморский блок, вращение которого на Чукотке приводит к растяжению, сопровождаемому землетрясениями (Рис. 2). Характер сейсмичности (механизм очагов землетрясений, распределение эпицентров и другие признаки) позволяют предполагать, что на востоке Чукотского полуострова в настоящее время развивается внутриплитный рифт (см. Рис. 2). Геодинамика растяжения, в частности, подтверждается многочисленными (около 40) термальными источниками, с температурой воды до 98° С. В меньшем количестве они известны и на п-ове Сьюард. На Чукотском п-ове известны структуры растяжения аналогичные оз. Байкал. Например, оз. Коолен является уменьшенной копией последнего (Рис. 3). Оба они имеют идентичную форму противоположных берегов и характеризуются одинаковым соотношением длины к ширине. К сожалению, в настоящее время, из-за недостатка данных, указать точно границу рифтовой зоны, невозможно.

В районе Берингова пролива, на суше, полуостровах Сьюард и Чукотском, а также вблизи них на островах в Беринговом море известны щелочные базальты. На Чукотке вулканизм развит на значительно меньших площадях чем на Аляске. Тем не менее, на южном побережье Чукотки закартированы потоки лав Энмелеского вулкана. По данным определений абсолютного возраста вулканитов, их извержения происходили в четвертичное и современное время. Как предполагается, они связаны с разломами, по которым происходят растяжения. Структурно Энмеленский вулкан приурочен к тектонической зоне, в которой находится оз. Коолен. В рифтовой зоне Чукотки, как и на Байкале, вулканиты располагаются лишь по одну сторону озер; с юго-запада и не известны по другую сторону большой оси. В обоих случаях

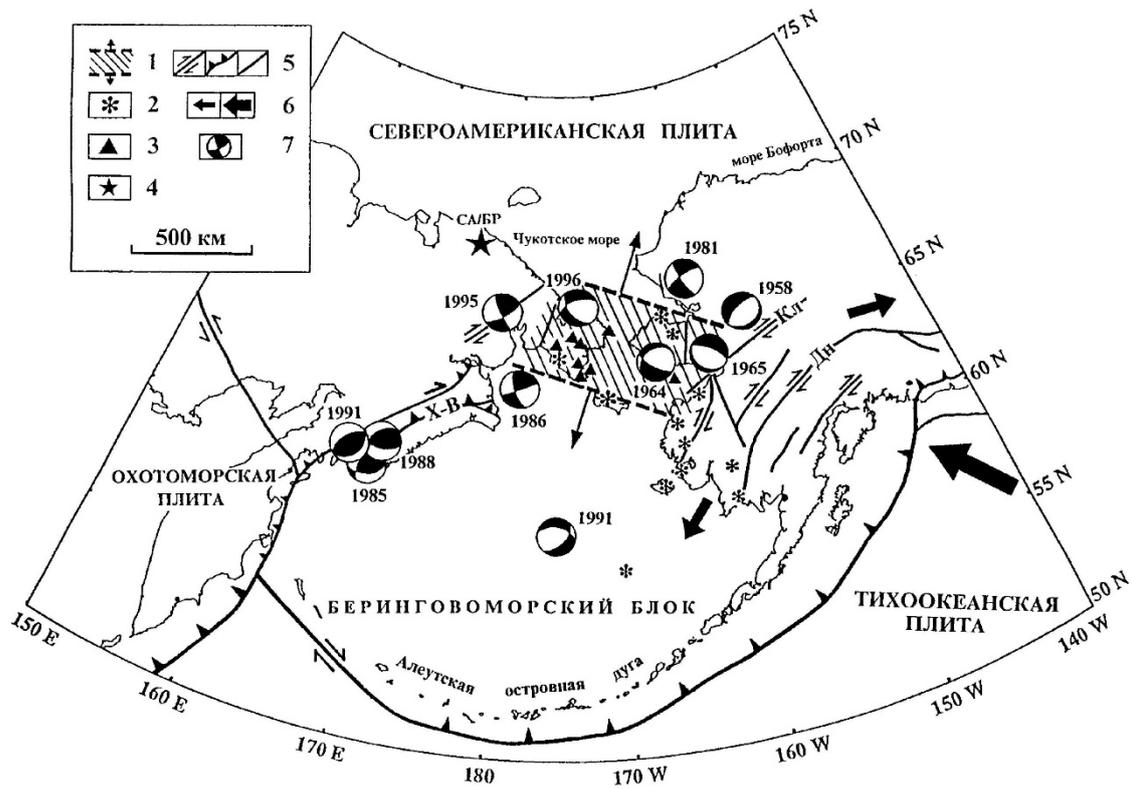


Рис. 2. Схема современной геодинамики Берингоморского региона

1 – рифт Берингова моря; 2 – центры кайнозойского вулканизма; 3 – источники гидро- и газотермальной деятельности; 4 – полюс вращения Берингоморского блока относительно Северо-Американской плиты; 5 – активные разломы и межплитные границы: сдвиги (Дн – Денали, Кл – Калтаг), взбросы и надвиги (Х-В – Хатырско-Вывенский) и неуставленного типа движения; 6 – направление движения плит и блоков; 7 – фокальные механизмы землетрясений; рядом указан их год.

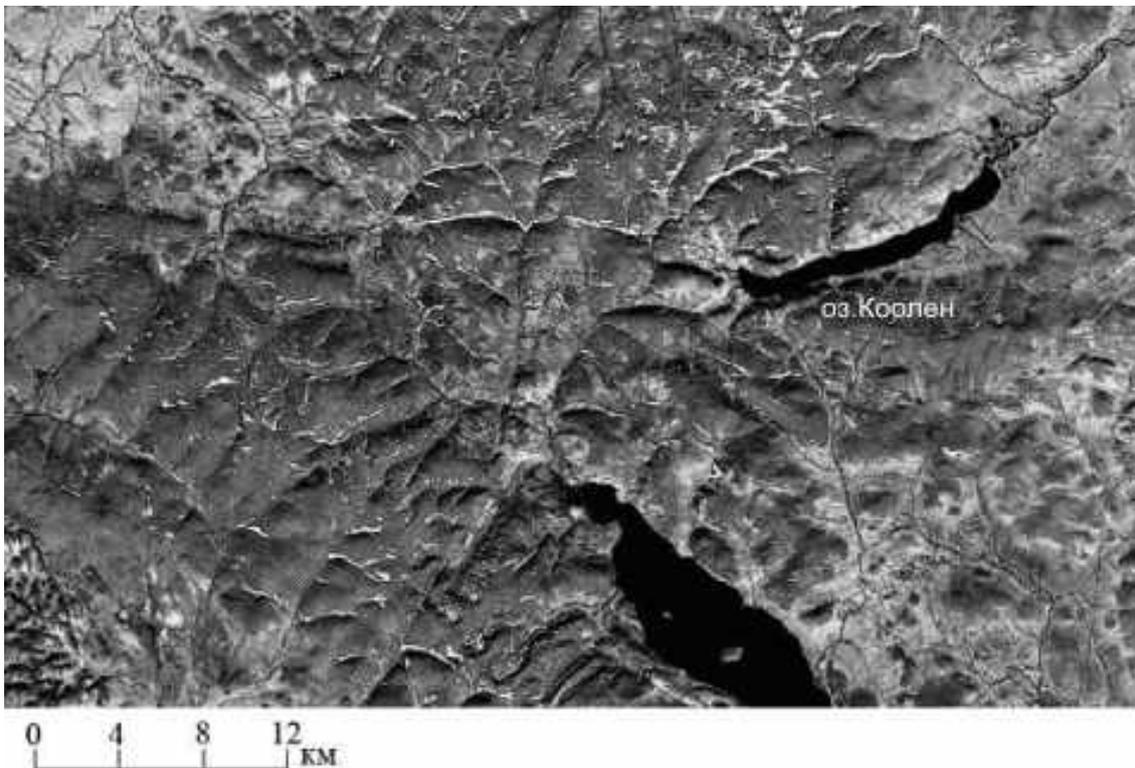


Рис. 3. Рифтогенная структура оз. Коолен

рифт развивается в направлении северо-востока. К северо-востоку от оз. Коолен, по данным дешифрирования космоснимков, выявлена протяженная зона линеаментов, в пределах которой протекает единственная вытекающая из озера река Кооленваам. Вдоль ее левого берега следует цепочка вытянутых озер. Отметим, что на Чукотском п-ове, как и на Байкале, эпицентры располагаются преимущественно вне акватории рифтогенных озер. По геологическим данным, оз. Коолен расположено в пределах купола, выраженного зоной «эксгумации» древних пород. Тектоническая активность террейнов подтверждается правосторонними разломами на Аляске: Денали, Никсон, Форк и Калтаг, которые возможно продолжаются и на шельфе Берингова моря. Центральная (внутренняя) и южная части Аляски смещаются друг относительно друга по правостороннему сдвигу Денали. Вращение Берингоморского блока, вероятно, сопровождается возникновением растягивающих напряжений на полуостровах Чукотка и Сьюард. Не исключено, что Берингоморский блок возник как задуговая структура в тылу Алеутско-Врангелевской островной дуги.

Тихоокеанская плита продолжает движение в северо-западном направлении. Вдоль южного склона Аляски восточная часть Алеутско-Врангелевской дуги остается активной. Проявлением воздействия Алеутско-Врангелевской дуги на Аляску является гранитный магматизм. Коллаж аккреционных террейнов, в том числе и Чукотки на севере-северо-востоке ограничен Канадским бассейном. Полюс вращения Евразийской и Северо-Американской плит в настоящее время располагается вблизи или южнее побережья моря Лаптевых (см. Рис. 2).

Фанерозойская история развития крайнего северо-востока Азии и Аляски, связанная с взаимодействием кратонов и их блоков, океанических плит, субдукционных зон, завершилась к настоящему времени возникновением аккреционных террейнов, находящихся в зоне взаимодействия континентальных плит Евразии и Северной Америки, а также и океанической Тихоокеанской.

Анализ расположения эпицентров землетрясений Чукотского п-ва и прилегающего шельфа морей показывает, что наряду с линейными зонами землетрясений, субпараллельными морским берегам, часть событий размещается «рассеянно». Эти землетрясения, вероятно вызваны изостатическим выравниванием поверхности полуострова и шельфа Чукотского моря, находившихся в период последнего гляциального максимума под сплошным покровом льда мощностью более 2,5-2,6 км [6]. Этот процесс, как и в Скандинавии сопровождается землетрясениями.

### **Заключение**

В результате проведенных исследований выявлены линейные сейсмогенерирующие зоны, характеризующиеся высокой плотностью эпицентров и максимальными значениями их

магнитуд. Другой тип сейсмичности – рассеянной, характеризуется отдельными разрозненными эпицентрами, расстояние между которыми составляет десятки километров, при существенно более меньших энергетических классах землетрясений.

### **Список литературы**

1. Белый В. Ф. Охотско-Чукотский вулканогенный пояс, кайнозойский вулканизм и магматизм. Тектоника Северо-Востока СССР. Геология СССР т. XXX, ч.2, М.: Недра, 1970. С. 225 - 226.
2. Ганов А.П., Седов Б.М. Сейсмичность Восточной Чукотки в естественных геофизических полях, //Вестник СМУ, 2006, № 6. - С.26-32.
3. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России /Под ред А.И.Ханчука. - Владивосток; Дальнаука, в 2кн. 2006. -981с.
4. Геология СССР Северо - Восток СССР т. XXX, ч. 1 М.: Недра,1970. -350с.
5. Натальин Б.А. Позднемеловые третичные деформации Чукотского полуострова и продолжения бассейна Хоуп и надвигового пояса Геральд (Чукотское море). Геотектоника, 1999 № 6. С.78-93.
6. Седов Б.М., Курткин С.В., Мяки К.Д. Макросейсмические исследования Восточной Чукотки. //Вестник Северного международного университета//. Магадан, 2005, выпуск 4. С. 53-60.
7. Седов Б.М., Курткин С.В. Сейсмичность Нешканской зоны // Вестник СМУ, 2005, № 5. С. 21-33.
8. Седов Б. М., Ганов А.П. Изостатическое неравновесие Восточной Чукотки и характер плейстоценового оледенения. // Геология, география и биологическое разнообразие Северо - Востока России: Мат. Дальневосточной региональной конференции, посвященной памяти А.П. Васьяковского и в честь его 95 - летия (Магадан, 28 – 30 ноября 2006 года) – Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2006. - С.33-35.
9. Fujita, K., Mackey, K. G., McCaleb, R. C., Gunbina, L. V., Kovalev, V. N., Imaev, V. S., and Smirnov, V. N. Seismicity of Chukotka, northeastern Russia: Geological Society of America, Special Paper 360, 2002, -P.p. 259-272.
10. Tectonic Evolution of the Bering Shelf-Chukchi Sea-Arctic Margin and Adjacent Landmasses //Ed.E.L. Miller, A.Grantz and S.Klemperer. Special Paper 360, Boulder, 2002.-388 p.

УДК 550.34.06

**ВЕЙВЛЕТ АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА 9-ТИ ЭТАЖНОЕ  
ЗДАНИЕ СЕРИИ 135**

**<sup>1,2</sup>Базаров А.Д., <sup>3</sup>Черных Е.Н., <sup>1,2</sup>Цыдыпова Л.Р.**

*<sup>1</sup>Геологический институт СО РАН, 670047, г. Улан-Удэ ул. Сахьяновой ба, e-mail:  
adbazarov@yandex.ru*

*<sup>2</sup>Бурятский Филиал Геофизической службы СО РАН, г. Улан-Удэ ул. Сахьяновой ба, e-mail:  
adbazarov@yandex.ru*

*<sup>3</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, e-mail: cher@crust.irk.ru*

**В докладе представлены результаты вейвлет анализа реакции здания на Байкальское землетрясение 2008 г., зарегистрированного инженерно-сейсмометрической станцией, установленной на жилом 9-ти этажном здании серии 135 в Академгородке г. Иркутска.**

Ключевые слова: вейвлет анализ, динамические характеристики, распространение сейсмических волн

**WAVELET ANALYSIS OF SEISMIC IMPACT ON A NINE-STOREYED BUILDING  
SERIES 135**

**<sup>1,2</sup>Bazarov A.D., <sup>3</sup>Chernyh E.N., <sup>1,2</sup>Tsydyпова L.R.**

*<sup>1</sup>Geological Institute of SB RAS, 670047, Ulan-Ude, 6a Sak hyanova Str., e-mail:  
adbazarov@yandex.ru*

*<sup>2</sup>Buryat Branch of Geophysical Survey of SB RAS, Ulan-Ude, 6a Sak hyanova Str., e-mail:  
adbazarov@yandex.ru*

*<sup>3</sup>Institute of the Earth Crust of SB RAS, Irkutsk, 128 Lermontova Str., e-mail: cher@crust.irk.ru*

**The results of the wavelet analysis of the building reaction on the Baikal earthquake of 2008 are presented in this paper. The earthquake was registered by engineering seismometric station, which was installed on a residential 9-storeyed building series 135 in Akademgorodok, Irkutsk.**

Keywords: wavelet analysis, dynamic characteristics, seismic wave propagation.

**Введение**

Динамическое поведение упругой конструкции при сейсмическом воздействии представляет собой сложный нестационарный динамический процесс, который зависит от характеристик колебаний грунта не только во временной области, но и в частотной. Поэтому оценка реакции здания на землетрясение, основанная только на анализе спектральных характеристик или амплитудных пиковых значений ускорения не совсем корректна. Для

## **ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА**

анализа поведения нестационарных процессов наиболее подходящим является вейвлет анализ. В отличие от преобразования Фурье, вейвлет-преобразование позволяет детализировать спектральные максимумы, как во временной области с помощью смещения по времени вейвлета, так и в частотной области через изменение частоты вейвлета. С помощью вейвлет анализа можно исследовать динамические особенности реакции здания на сейсмическое воздействие в частотно-временном пространстве.

### **Цель работы**

Целью данной работы является исследование коэффициента усиления колебаний 9-ти этажного здания под воздействием серии сейсмических событий с использованием вейвлет-анализа.

### **Материал исследования**

В декабре 1998 года введена в эксплуатацию 16-канальная инженерно-сейсмометрическая станция в 9-ти этажном жилом доме серии 135 в Академгородке. Акселерометры А1632 установлены в подвальном помещении и на 3, 5, 7, 9 этажах (Рис. 1). За период работы инженерно-сейсмометрической станции записан ряд землетрясений с эпицентральными расстояниями от 90 до 600 км и энергетическими классами в диапазоне от 9 до 15, в том числе ряд землетрясений, которые ощущались в Иркутске, Ангарске и др. городах.

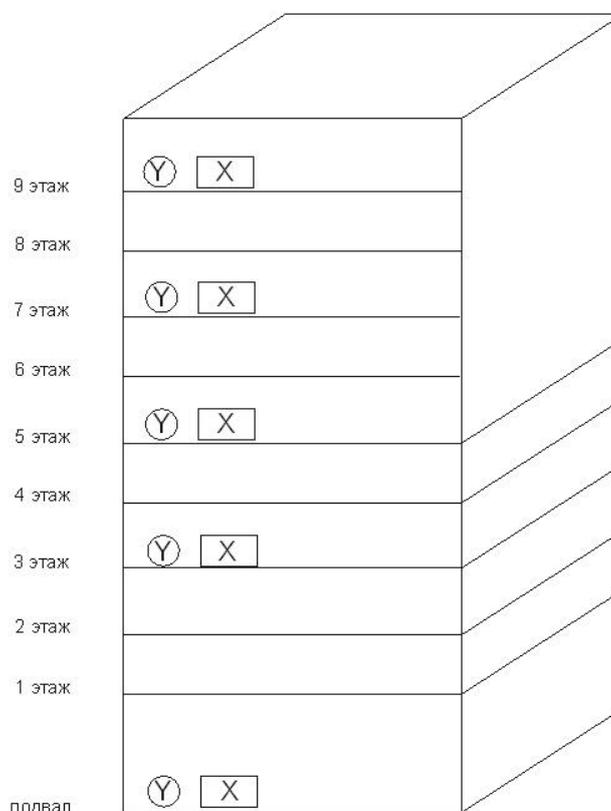


Рис. 1. Схема инженерно-сейсмометрического мониторинга здания

## ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

В работе выполнен анализ инструментальных записей Байкальского землетрясения 2008 г. Землетрясение на Байкале 2008 года – сильное землетрясение, произошедшее 27 августа 2008 года в 10:35 по местному времени (UTC+8). Эпицентр толчков находился на дне озера Байкал в 30 км от Байкальска, в 75 км к югу от Иркутска (табл. 1). Подземные толчки ощущались на всей территории Восточной Сибири. Центральная сейсмическая станция в Иркутске зарегистрировала толчки силой 6–7 баллов. Несмотря на огромную мощность толчков, землетрясение практически не вызвало существенных разрушений.

Таблица 1

### Характеристики сейсмических событий

№	Дата	Время	Широта	Долгота	D, км	Энерг. класс, К
1	27.08.08	02:07:56	51.65	103.93	75	12
2	27.08.08	01:41:32	51.61	104.06	72	13
3	27.08.08	01:35:31	51.61	104.07	72	15.9
4	30.08.08	13:53:29	51.64	104.03	74	12.1

По данным инженерно-сейсмометрической станции в основании здания были зафиксированы следующие максимальные значения (табл. 2):

Таблица 2.

### Параметры сейсмических колебаний у основания здания

№	X (продольное)			Y (поперечное)		
	A, мм/с <sup>2</sup>	T, Сек.	F, Гц.	A, мм/с <sup>2</sup>	T, Сек.	F, Гц.
1	3.68	0.28	3.57	31.1	0.24	4.17
2	5.22	0.2	5	61.05	0.2	5
3	-	-	-	339.26	0.2	5
4	9.15	0.16	6.25	77.61	0.16	6.25

### Результаты исследования и их обсуждение

Для анализа реакции здания на сейсмические события был использован вейвлет анализ [2, 3] пакета программ [1], позволяющий разложить зарегистрированные записи землетрясения на частотные составляющие. На рисунке 2 показаны акселерограммы и вейвлетграммы входного сигнала на уровне подвала и реакции здания на 9 этаже. На вейвлетграммах видно, что входной сигнал имеет широкий частотный диапазон – 0.1–0.5 сек (2–10 Гц). Реакция здания сосредоточена основном на частоте 2 Гц (T=0.2 сек).

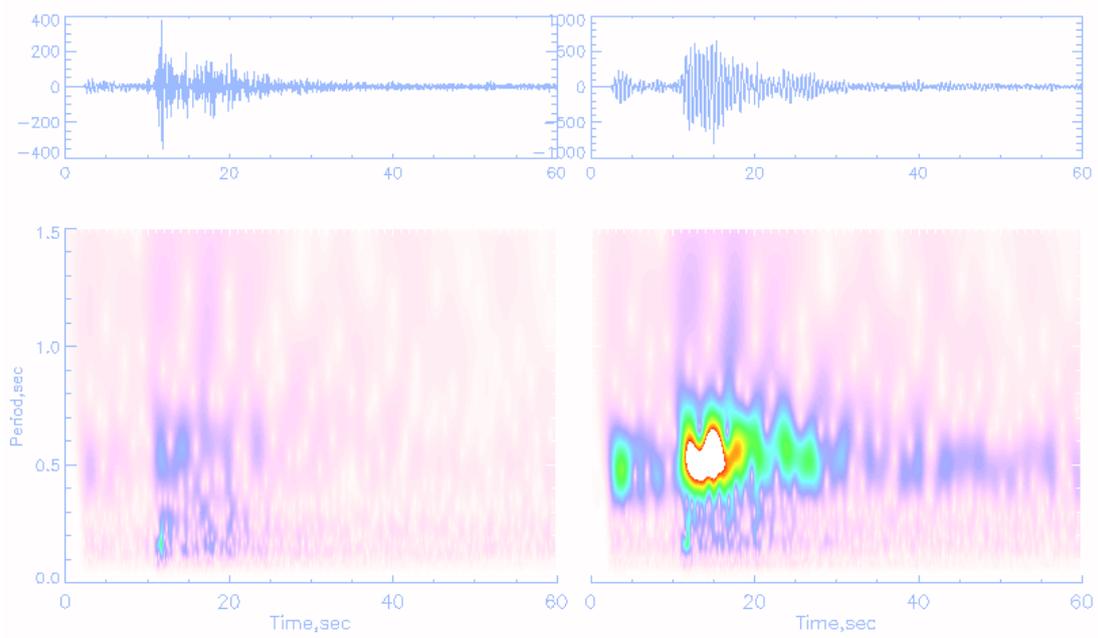


Рис. 2. Акселерограмма и вейвлетграммы поперечной компоненты землетрясения, зарегистрированного на уровнях подвала и 9-го этажа здания

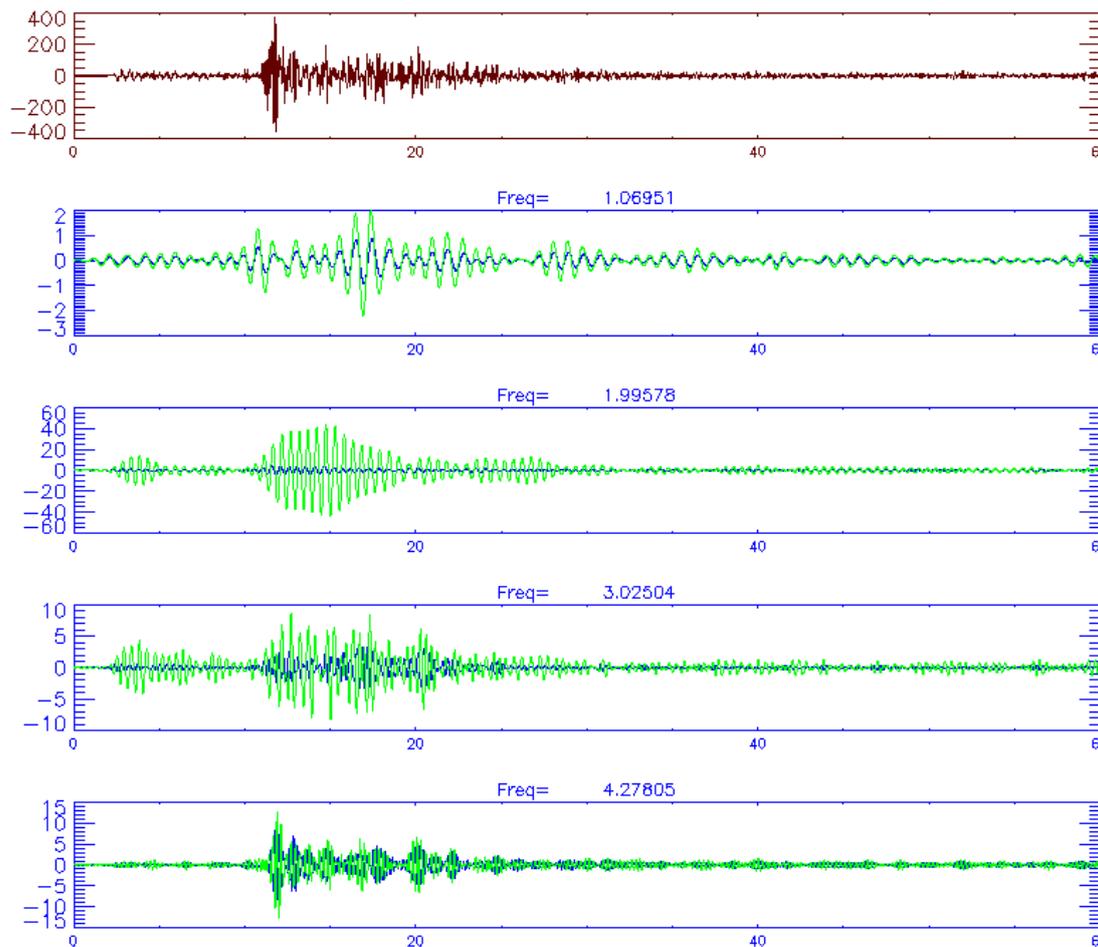


Рис. 3. Выборочные частотные акселерограммы поперечной компоненты на частотах 1.0, 1.9, 3.0, 4.3 Гц

## ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

На рисунке 3 представлены компоненты поперечных записей землетрясения №3 на частотах 1.0, 1.9, 3.0, 4.3 Гц для датчиков, установленных в уровне подвала (синий цвет) и на 9 этаже (зеленый цвет) здания. При таком представлении землетрясения на компоненте 1.9 Гц отчетливо выделяются резонансные колебания, связанные с совпадением собственных частот здания с частотами землетрясения.

Разложение инструментальных записей на частотные составляющие позволяет исследовать частотные зависимости коэффициента усиления колебаний относительно нулевого уровня и распределение амплитуд колебаний. На рисунке 4а. показаны распределение максимальных амплитуд ускорений в зависимости от частот колебания. В основании здания максимальная амплитуда ускорения лежит в диапазоне 5–10 Гц. Для 5-го этажа амплитуда повышается в 1,5 раза из-за усиления за счет второй формы колебания. Амплитуда колебания на 9 этаже равна колебаниям на уровне подвала, т.е. коэффициент передачи для частотного диапазона 5–10 Гц равен 1. В частотном диапазоне 1–3 Гц картина распределения амплитуд ускорения совсем другая. В уровне подвала амплитуда ускорения имеет значение – 4 мм/сек<sup>2</sup>, для 5-го этажа колебания усиливаются до значения 30 мм/сек<sup>2</sup>, на 9 этаже амплитуда уже равна – 46 мм/сек<sup>2</sup>. Для частотного диапазона 1–3 Гц наблюдается сильное резонансное усиление амплитуды колебаний с максимумом на частоте 1.9 Гц.

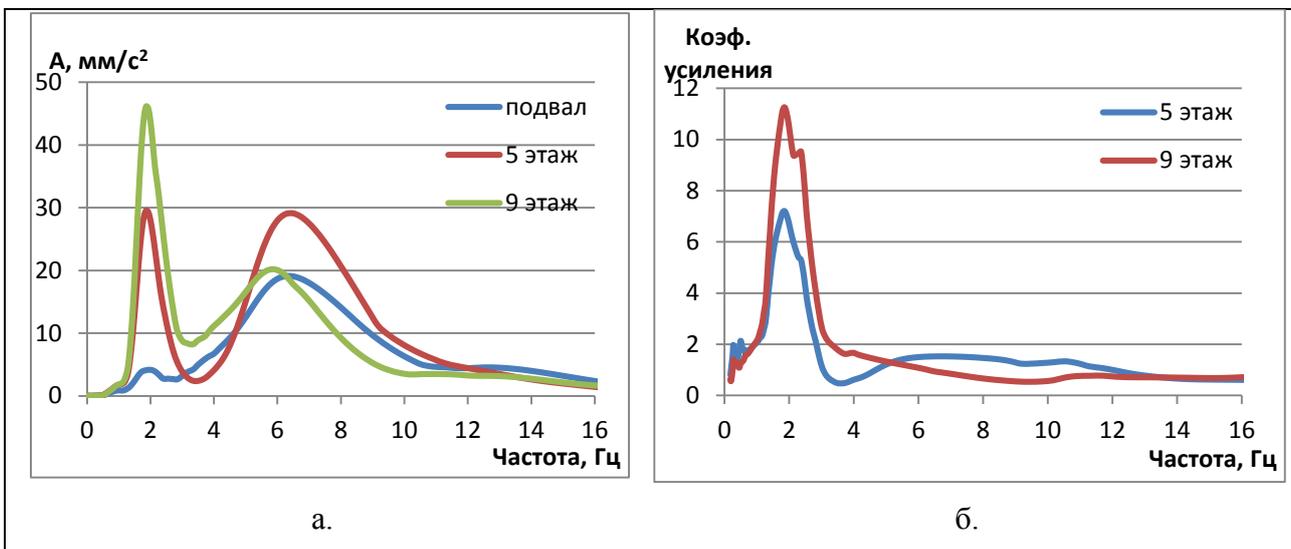


Рис. 4. Графики зависимости максимальных ускорений от частоты (А) и отношение максимальных амплитуд ускорения на 5 и 9 этажах к 1 этажу для поперечных колебаний

Таким образом, можно получить частотную зависимость коэффициента усиления колебаний здания, путем вычисления отношения максимальных амплитуд ускорений на частотных вейвлет срезах. На рис 4б. показана, вычисленная для продольного направления частотная зависимость коэффициента усиления колебаний здания на 5 и 9 этажах под воздействием сейсмических событий.

### **Заключение**

В работе был проведен анализ колебаний 9 этажного здания 135 серии под воздействием землетрясений, зарегистрированных инженерно-сейсмометрической станцией в период 2008 г. Показаны проявления резонансных колебания здания на частоте основного тона здания с коэффициентом усиления равным – 11. С помощью вейвлет анализа изучены частотные зависимости коэффициента усиления колебаний зданий под воздействием сейсмических событий.

### **Список литературы**

1. Базаров А.Д. BuildMod – программа для анализа динамических характеристик инженерных сооружений // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 2014619571, Рос. Федерация, заявка №2014614214. 2014.
2. Новиков Л.В. Основы вейвлет-анализа сигналов. Учебное пособие. – Спб, 1999. – 152 с.
3. Шестаков О.В. Вейвлет-анализ и его приложения. Учебное пособие / О.В. Шестаков, Т.В. Захарова. – М.: Инфра-М, 2014. – 158 с.

**ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ЭПИЦЕНТРАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ СЕВЕРОВОСТОЧНОГО ФЛАНГА БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА И ОЛЕКМО-СТАНОВОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЗОНЫ**

**В.С. Имаев<sup>1</sup>, Л.П. Имаева<sup>1</sup>, Н.Н. Гриб<sup>2</sup>, И.И. Колодезников<sup>3</sup>, В.М. Никитин<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Институт Земной Коры СО РАН, г. Иркутск, e-mail: imaev@crust.irk.ru*

<sup>2</sup>*Технический институт (филиал) ФГАОУ ВПО «Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Амосова» в г. Нерюнгри, 678960 Республика Саха (Якутия), г. Нерюнгри, ул. Кравченко, 16, e-mail: grib@nfygu.ru*

<sup>3</sup>*Академия наук Республики Саха (Якутия), Якутск, ул. Ленина, 33, e-mail: anrsya@mail.ru*

Особенности геодинамического развития и механизм формирования впадин северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) остаются малоизученными, в следствие недостатка фактических данных о разломной структуре, полях напряжений и геофизических характеристик.

Данное исследование направлено на выявление современного структурно-тектонического плана наиболее активного в сейсмотектоническом отношении сегмента БРЗ – ее северо-восточного фланга, в пределах которого произошел ряд сейсмических катастроф с  $M > 6,0 - 7,9$ .

Рассматриваются закономерности структурообразования и кинематические типы сопряжения активных разломов в зонах динамического влияния краевых тектонических швов, образующих разломно-блоковые структуры, где накапливаются значительные тектонические напряжения. Разрядка их проявляется в виде катастрофических землетрясений с определенным типом фокальных механизмов в очагах и в соответствии с динамикой взаимоотношения крупных тектонических блоков.

Составные террейны Забайкалья и прилегающих с востока территорий Алдано-Станового блока представляют собой коллаж микроконтинентов с раннедокембрийской корой, причленение которых к Сибирскому кратону началось в протерозое и завершилось в позднем мезозое, когда прекратил свое существование Монголо-Охотский океанический бассейн [1]. Рифейские, палеозойские и раннемезозойские офиолиты, комплексы активных и пассивных континентальных окраин устанавливаются в различных сегментах Монголо-Охотской структуры, к северу от которой располагаются сооружения Байкало-Витимского и Алдано-Станового супертеррейнов, а к югу структуры Монголо-Охотского пояса.

Важнейшими тектоническими элементами рассматриваемого региона являются Прибайкальский (Байкало-Патомский) и Жуинско-Джелтулакский швы шарьяжно-сдвиговой

## *ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА*

природы, по которым окончательное причленение Байкало-Витимского супертеррейна к Сибирскому кратону произошло только в позднем палеозое. Раннедокембрийский Становой шов был трансформирован в поздней юре-раннем мелу, когда Становой блок был шарьяжирован на Алданский.

Современная разломно-блоковая структура (РБС) северо-восточного фланга БРЗ включает серию рифтовых впадин, наиболее крупными из которых являются Кичерская, Верхнеангарская, Муйская и Чарская и разрывных нарушений, входящих в систему основных краевых швов. Они являются наиболее молодыми по образованию частями БРЗ и характеризуются самой высокой скоростью сейсмотектонических деформаций, выявленных по геолого-структурным [2, 3], сейсмологическим [4] и геодезическим данным [5], и как следствие – главными сейсмогенерирующими структурами.

Учитывая генезис и местоположение морфоструктурных элементов на территории исследования выделяется пять РБС регионального плана, названия которых созвучны с общепринятыми для краевых швов и крупных региональных разломных зон: Байкало-Муйская, Муйско-Чарская (Кодаро-Удоканская), Джелтулакская, Западностановая, Чаро-Темулякитская.

Они представлены сопряженными системами отдельных сдвиговых нарушений различной кинематики и блоками новейших дифференцированных поднятий. Устанавливаются два типа сопряжений структур, при котором РБС северо-восточного (Муйско-Чарская, Чаро-Темулякитская) простираний характеризуются правосдвиговой кинематикой, а РБС северо-западного и субширотного направления (Западностановая и Джелтулакская) – имеют левосдвиговый тип подвижек. Амплитуды латеральных смещений вдоль названных РБС оцениваются до нескольких сотен километров [6]. Современной тектонической активизацией региона охвачено большое количество разломов, отличающихся глубиной заложения (от мантийных до коровых), кинематикой и возрастом (от архейского времени заложения до позднего кайнозоя). К ним приурочены зоны милонитизации, низкотемпературного диафтореза и брекчирования мощностью до нескольких сотен метров, а их современная кинематика определяется региональным полем тектонических напряжений, связанным с общим сжатием земной коры в широтном и северо-восточном направлении [2,3,7]. В современном морфотектоническом плане они формируют на флангах зоны сжатия, орографически выраженные альпинотипными хребтами (Кодар, Удокан, Калар и др.) и структуры растяжения в виде специфических ромбовидных впадин типа «pull-apart» (Кичерская, Верхнеангарская, Муйская, Чарская). В тыловых частях сдвиговых зон - Западностановой и Джелтулакской РБС, при косом компенсационном растяжении,

## *ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА*

развиваются грабенообразные (щелевидные) впадины, ярким примером которых являются Имангро-Чебаркасский грабен и серия ему подобных в среднем течении р. Олекма.

Северо-восточный фланг БРЗ охвачен проявлениями сейсмичности, которые маркируют местоположение западной области Байкало-Станового сейсмического пояса. На фоне многочисленных слабых землетрясений здесь обособляются пять локальных сгущений сейсмичности (эпицентральных полей): Северобайкальское, Муйское, Олдонгсинское, Чарское, Олекминское [2,7,8]. Рассмотрим наиболее сильные события ( $M > 6,0$ ), которые характеризуют сеймотектоническую обстановку данного региона.

В зоне динамического влияния западного фланга Джелтулакского структурного шва, выраженного Намаракитским, Таксимо-Джелидинским, Южно-Муйский и другими новейшими разломами, 27.06.1957г. произошло одно из сильнейших за последние сто лет Муйское землетрясение с  $M = 7,9$ . Общая длина разрыва в очаге основного толчка, состоящего из 3-х последовательно вспарывающихся нарушений, оценивается  $50 + 5$  км (4). Механизм очага был определен по знакам первых вступлений продольных сейсмических волн и с помощью инверсии форм объёмных телесейсмических волн. В первом случае, решения предполагали комбинации сбросовых и левосдвиговых подвижек по субширотно ориентированным плоскостям разломов, падающих к юго-западу или к югу, а по плоскостям северо-восточного простирания осуществлялись правые сдвиги. Во втором случае, механизмы очагов, несмотря на наличие трех подсобытий, имел единую левосдвиговую кинематику. Механизм одного из сильнейших афтершоков, также имел сдвиговый характер.

Муйское событие сопровождалось нарушением земной поверхности как сеймотектонического, так и сейсмогравитационного характера. При землетрясении возникла сложная система сейсмодислокаций общей протяженностью около 30 км. Среди них преобладали сдвиги с максимально замеренной амплитудой более 5-6 м. и сдвиго-сбросы с вертикальным смещением до 3 м., имели место также трещины растяжения, сколы и структуры сжатия. Механизм данного землетрясения полностью отразил взаимодействие структур северо-восточной (Забайкальский блок) и северо-западной (Алдано-Становой блок) ориентировок, разитых в плейстосейстовой области Джелтулакского краевого шва.

Одним из активнейших участков Станового краевого шва является бассейн среднего течения р. Олекма, где в 1958-1987 гг. произошли три сейсмических катастрофы: 9-балльные Нюкжинское и Олекминское землетрясения 1958г. ( $M=6,5$ ), 9-10 балльное Тас-Юряхское 1967 года ( $M= 7,0$ ), а также 7-балльный Дырындинский подземный толчок 1987 г. ( $M=5,0$ ). Территориальная близость эпицентров этих событий и сходные решения механизмов очагов (сбросо-сдвиги с правыми северо-восточными и левыми северо-западными нодальными плоскостями) подчеркивают их генетическое родство и могут свидетельствовать об

## *ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА*

активизации этого участка в связи с предшествующей этим землетрясениям Муйской катастрофы.

В северной оконечности суходольных впадин оз. Байкал 21.03.1999г., в районе бифуркации зоны Прибайкальского шва, представленного веерообразным расщеплением серии разломов (Кичеро-Мамский, Верхнеангарский, Северо-Муйский), в районе межвпадинной перемычки, разделяющей Кичерскую и Верхнеангарскую впадину, произошли два сильных землетрясения с  $M=6,0$  и  $5,6$ .

Оба землетрясения характеризовались сдвиговым механизмом с небольшой сбросовой составляющей. Одна из плоскостей разрывов имеет север-северо-восточное простирание, а другая плоскость – с левосторонним близширотным сдвигом [3].

Эпицентральные области двух следующих сильных землетрясений приурочены к юго-восточному борту Чарской впадины. Они произошли 26.04.1994 г. и имели магнитуды  $5,8$  и  $6,3$ . При обоих землетрясениях выявляются нодальные плоскости северо-восточной ориентации типа сброса со сдвиговой компонентой: левостороннего сдвига по плоскости субширотного простирания и правостороннего по северо-восточной.

Анализ напряженного состояния земной коры северо-восточного фланга БРЗ, выявленный по механизмам сильных землетрясений с  $M=6,0 - 7,9$  установил доминирование режима сжатия. Основной вклад в выделение сейсмической энергии обеспечивают сдвиговые сейсмотектонические деформации и их различные комбинации.

В итоге, современная геодинамика и сейсмотектоническая позиция северо-восточного фланга БРЗ, структурно выраженная Байкало-Муйской, Муйско-Чарской, Чаро-Темулякитской, Западностановой и Джелтулакской РБС и анализ кинематических подвижек в основных эпицентральных полях отражают условия взаимодействия двух крупных блоков (Забайкальского и Алдано-Станового), которые характеризуют динамику литосферных плит, сближающихся в северо-восточном направлении с разными скоростями: Евразийской ( $0,2$  см/год) и Амурской ( $1-1,3$  см/год) [7, 8]. Наибольшая концентрация землетрясений в виде сейсмических зон и поясов и эпицентральных полей наблюдается в краевых частях этой контактной области, возникшей между названными плитами, вдоль системы правосторонних сдвигов и сдвиго-сбросов северо – восточного фланга БРЗ и левосторонних сдвигов и взбросо-сдвигов Западностанового блока.

Забайкальский блок – под влиянием «байкальского» поля тектонических напряжений смещается на юго-восток относительно Сибирской платформы со скоростями  $0,5-0,7$  см/год (по данным GPS-наблюдений) [3,9,]. Западностановой блок, зажатый между Евразийской, Амурской плитами и Забайкальским блоком, как бы вращается по часовой стрелке относительно Евразийской плиты со скоростями  $0,2-0,3$  см/год (линейно-угловые

геодезические измерения на Олекминском геодинамическом полигоне) [5], формируя в бассейне р. Олекмы южнее п. Усть-Нюкжа систему взбросов и надвигов противоположной вергентности к фронтальным надвигам Забайкальского блока. Данная тектоническая обстановка северо-восточного фланга БРЗ формирует на его границах определенные парагенезисы активных разломов: Джелтулакский краевой шов и Западностановые левые сдвиги и взбросо-сдвиги; правые взбросо-сдвиги Байкало-Муйской, Чаро-Темулякитской и Муйско-Чарской РБС. Эти структурно-тектонические соотношения находят отражение в ориентациях плоскостей сместителей, определенных по данным фокальных механизмов сильных землетрясений.

Таким образом, установленные закономерности в проявлении сейсмичности, характере полей тектонических напряжений и развитии определенных парагенезисов разломов, возникших на границах литосферных плит, определяют мозаику блоков современного морфотектонического плана северо-восточного фланга БРЗ.

*Данное научное исследование выполнено при поддержке интеграционного проекта СО РАН, гранта Министерства Науки и Образования РФ (Гос. задание № 5.1771.2014/К, а также частично при поддержке гранта Российского научного фонда 15-17-20000.*

### **Список литературы**

1. Гусев Г.С., Хаин В.Е. О соотношениях Байкало-Витимского, Алдано-Станового и Монголо-Охотского террейнов (юг средней Сибири) Геотектоника, 1995, N 5, с.62-78
2. Николаев В.В., Семенов Р.М., Солоненко В.П. Сейсмогеология Монголо-Охотского линеамента (восточный фланг). – Новосибирск: Наука, 1979.
3. Sankov V., Deverchere J., Gaudemer Y. et.al. Geometry and rate of faulting in the North Baikal Rift, Siberia, Tectonics-2000- 19(4) – P.707-722
4. Курушин Р.А., Мельникова В.И., Гилева Н.А. Муйское землетрясение 27 июня 1957 г. (сейсмологические и сейсмогеологические данные) Проблемы современной сейсмогеологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии (Материалы Всероссийского совещания), г. Иркутск, 2007, с. 193-202.
5. Бочаров Г.В., Замараев Н.Н. Геодезические измерения на геодинамических полигонах Южной Якутии// Геодезия и картография. 1991. № 3. С. 30–34.
6. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Под ред. Л.М. Парфенова и М.И. Кузьмина. – М.: МАИК «Наука/ Интерпериодика», 2001.
7. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмоструктура Якутии. – М.: ГЕОС, 2000.
8. Радзиминович Н.А., Мельникова В.И., Козьмин Б.М., Татомир Н.В. Олдонгсинский рой землетрясений 1997–2002 гг. на северо-восточном фланге Байкальской рифтовой зоны //

Геодинамика и геологические изменения в окружающей среде северных регионов. – Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2004. Т.2. С.193–196.

9. Sella G.F., Dixon T.H., Mao A. Revel: A model for recent plate velocities from space geodesy // Geoph. Res. Let. Vol. 107. № B4. 2002. P.11-1–11-32.

УДК 551.24:550.34

## **СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ МИКРОСЕЙСМ ДО И ПОСЛЕ СЛАБЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ТАН ЛУ**

**<sup>1</sup>Колотова Л.Г., <sup>1</sup>Харитонов М.Е., <sup>2</sup>Пупатенко В.В., <sup>2</sup>Рябинкин К.С.**

<sup>1</sup>*Бурейская ГЭС, геодинамический полигон, п. Талакан, Россия, e-mail: kolotovalg@list.ru*

<sup>2</sup>*Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН. 680000 Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65/*

Представлены результаты обработки слабых землетрясений в двух пунктах разломной зоны Тан Лу. Для южной зоны района Бурейской ГЭС выделен эффект увеличения мощности спектра на частотах от 1Гц до 5Гц при прохождении сейсмических волн землетрясений и резонансное возбуждение среды на высоких частотах. Для второго пункта наблюдений вблизи озера Удыль данный эффект не наблюдается. Показано, что увеличение мощности в интервале указанных частот может быть связано с резонансным возбуждением плотины и взаимодействием деформационных волн с пространственными неоднородностями земной коры.

Ключевые слова. Слабые землетрясения, техногенная сейсмичность, спектры микросейсм, резонансное возбуждение

## **THE SPECTRAL COMPOSITION OF MICROSEISMS BEFORE AND AFTER THE TAN-LU WEAK EARTHQUAKES**

**<sup>1</sup>Lyudmila G. Kolotova, Mikhail E. Haritonov, <sup>2</sup>Victor V. Pupatenko and <sup>2</sup>Konstantin S. Ryabinkin**

<sup>1</sup>*Bureyskaya HPP, geodynamic polygon, Talakan Settlement, Russia*

<sup>2</sup>*Yu.A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, 65, Kim Yu Chen St., Khabarovsk, 680000, Russia*

The results of weak earthquake data processing are presented from two observation sites located in the Tan-Lu fault zone. In the southern zone of the Bureyskaya Hydro Power Plant (HPP) area, the effect of increasing power spectrum in the frequency range from 1 Hz to 5 Hz was observed during the passage of seismic waves from earthquakes and the resonant excitation of the medium at high frequencies. This effect was not observable at the second site located near Lake Udyl. It is shown that an increase in the power spectrum in the range of these frequencies may be due to the resonant excitation of the dam and the interaction of strain waves with spatially inhomogeneous crust.

Keywords. Weak earthquake, technogenic seismicity, MS spectra, resonant excitation.

## **Введение**

Сейсмологические и сейсмометрические методы используют для регистрации упругих колебаний, вызываемых землетрясениями и техногенными воздействиями на геологическую среду, как один из основных косвенных способов контроля напряженно-деформированного состояния горных пород. В данной работе для решения данных задач использованы результаты регистрации слабых землетрясений в двух пунктах: вблизи озера Удьяль, на северо-восточном замыкании системы разломов Тан Лу и на локальной сейсмологической сети Бурейской ГЭС.

На станциях локальной сейсмологической сети Бурейской ГЭС установлены цифровые регистраторы с непрерывной записью типа REF ТЕК-130, укомплектованные короткопериодными сейсмоприемниками GS-1. На озере Удьяль наблюдения проводились аналогичным регистратором, но с широкополосным сейсмометром REF ТЕК 150-120. В течение 9 дней в данном пункте в радиусе 360 км было зарегистрировано 20 сейсмических событий в различных азимутах (Рис. 1).

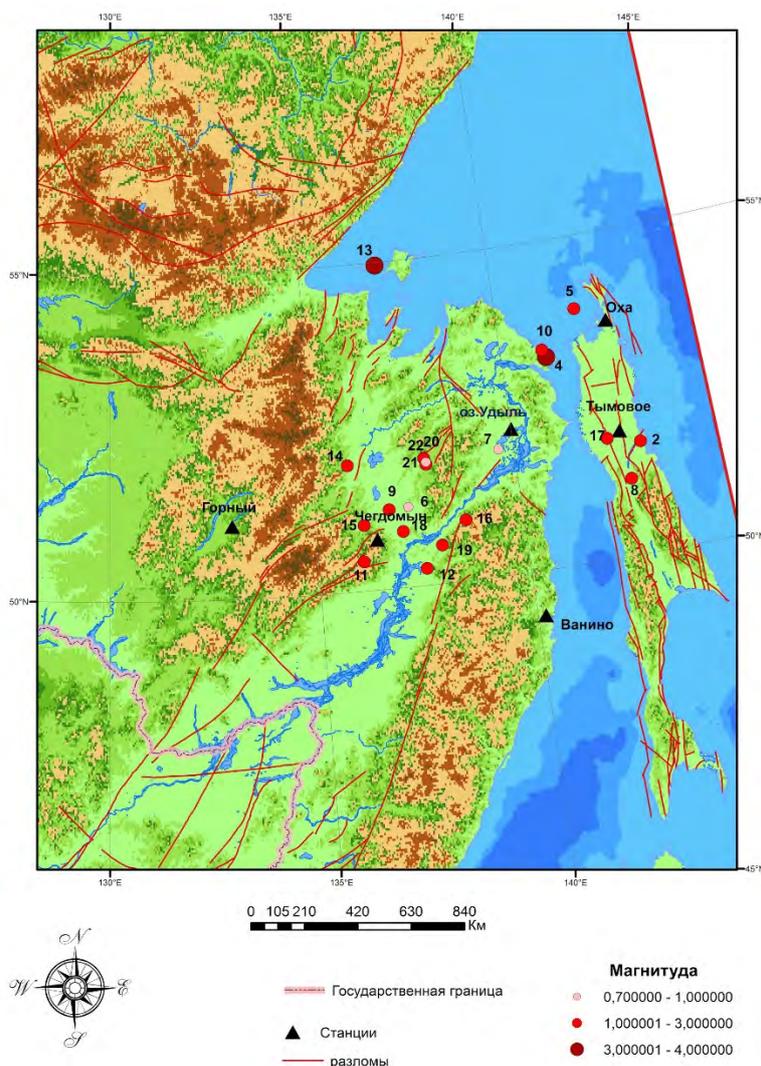


Рис. 1. Схема расположения станций ГС РАН и пункта «Удьяль»

***ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ***

Для сравнения микросейсмических шумов в двух пунктах регистрации был применен метод спектрального анализа с использованием возможностей программного комплекса MatLab.

В пакете расширения Signal Processing Toolbox программного комплекса MatLab существуют специальные функции, позволяющие проводить спектральный и спектрально-временной анализ сигналов. Основная используемая для этого функция «spectrogram» рассчитывает спектральную плотность мощности коротких отрезков сигнала, следующих друг за другом с некоторым перекрытием. Таким образом получается определять не только спектральный состав сигнала, но и его изменение во времени. Разрешение во временной области не зависит от частоты и остается постоянным.

В настоящей работе была разработана процедура, позволяющая получать и изображать спектрограммы в более удобном виде, и частично автоматизирующая ручные операции. При построении спектрограмм для пункта «Буря» использовались следующие параметры: оконная функция Ханна [<http://www.dsplib.ru/content/winadd/win.html>]; ширина сегментов – 500 отсчетов (5 сек при частоте дискретизации 100 Гц); перекрытие сегментов – 480 отсчетов (шаг между окнами составлял 20 отсчетов или 0,2 сек). Для пункта «Удиль» построения спектрограмм аналогичны, с удвоением масштаба, поскольку регистрация велась с частотой дискретизации 200 Гц. Диапазон частот сверху был ограничен частотой Найквиста, то есть до 50 Гц для станций сети Бурейской ГЭС и 100 Гц для пункта «Удиль». Интегральные спектральные кривые построены для двух интервалов длиной 3-5 минут, до и после зарегистрированных землетрясений.

**Результаты частотно-временного анализа**

Спектральные и частотно-временные характеристики микросейсм пунктов Бурейской ГЭС, позволяют сделать однозначный вывод о природе регистрируемых микросейсм в интервале частот 2-4 Гц с явно выраженным максимумом (рис 2. А), которые представляют собой автоколебания плотины на частоте 2.15-2.35 Гц, от гидроударных явлений в водоводе (2.6-3.2 Гц). Установлено, что компактность и длительность пакетов зависит от времени прохождения генератором «тихого» окна внутри неблагоприятной зоны. Диапазон указанных колебаний может определяться двумя основными факторами: присоединенной массой воды (основная мода) и выбранной группой генераторов (гидродинамическая «пружина»).

Для всех землетрясений вблизи Бурейской ГЭС характерно увеличение спектральной плотности мощности сигналов в данном интервале частот (Рис. 2 В). Причем увеличение происходит в момент прохождения Р-волны.

Второй факт, установленный для ближней зоны Бурейской ГЭС, заключается в возбуждении высокочастотных микросейсм (>10 Гц) после землетрясения.

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

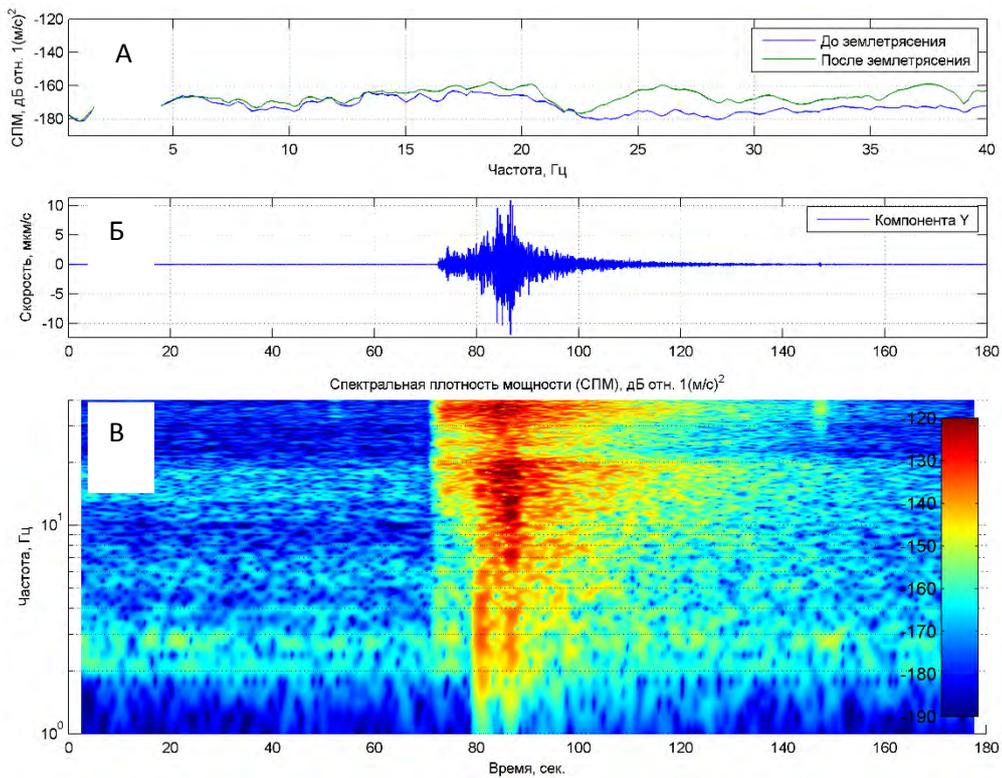


Рис. 2. Спектральный состав микросейсм до и после землетрясения 03.02.2015 вблизи

Бурейской ГЭС, Y-компонента, пункт CHGD

Обозначения. А - интегральные спектральные кривые микросейсм; Б - волновая форма Y-компоненты землетрясения; В - частотно-временная развертка (динамическая спектрограмма) землетрясения.

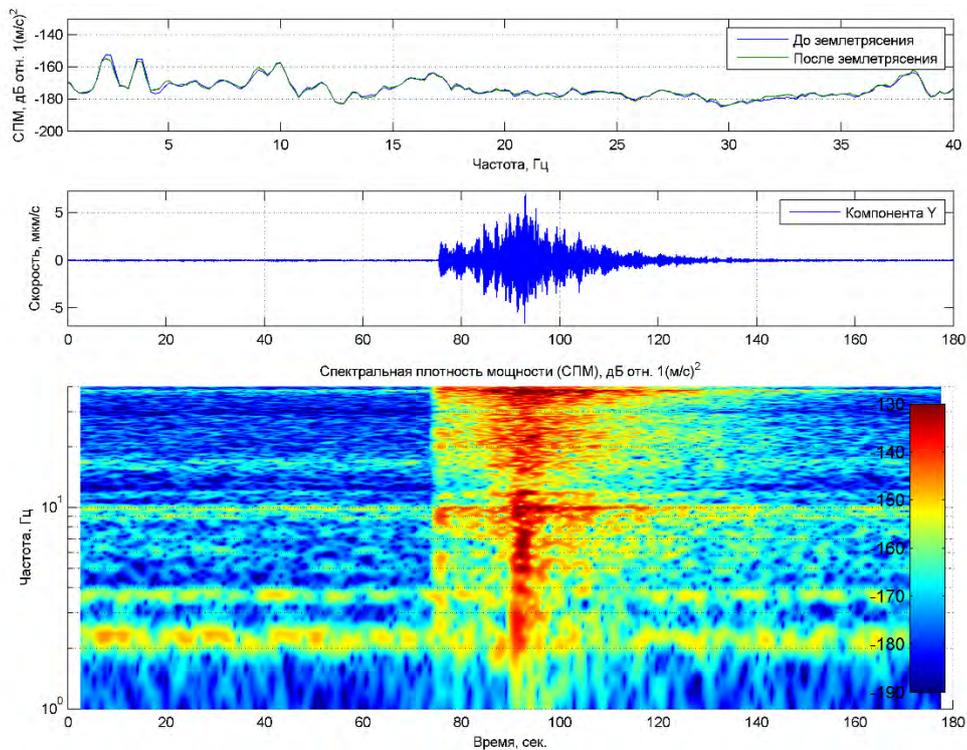


Рис. 3. Спектральный состав микросейсм до и после землетрясения 07.06.2015 вблизи

Бурейской ГЭС, Y-компонента, пункт CHGD

Обозначения. Порядок рисунков и их расшифровка аналогичны Рис. 2.

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

Длительность возбужденного состояния практически равна длительности сейсмического сигнала от землетрясения. Причем на интегральных кривых (Рис. 2А, 3А) данный эффект практически не заметен. На динамических диаграммах (Рис. 2В, 3В), после момента времени состояние геологической среды заметно отличается от состояния до момента землетрясения.

Для пункта «Удиль» основной состав микросейсм определяется волновыми явлениями на поверхности озера. Землетрясения не меняют состояние геологической среды, хотя в отдельных случаях также наблюдается увеличение спектральной плотности мощности сигнала в диапазоне частот 1-2 Гц (Рис. 4, 5).

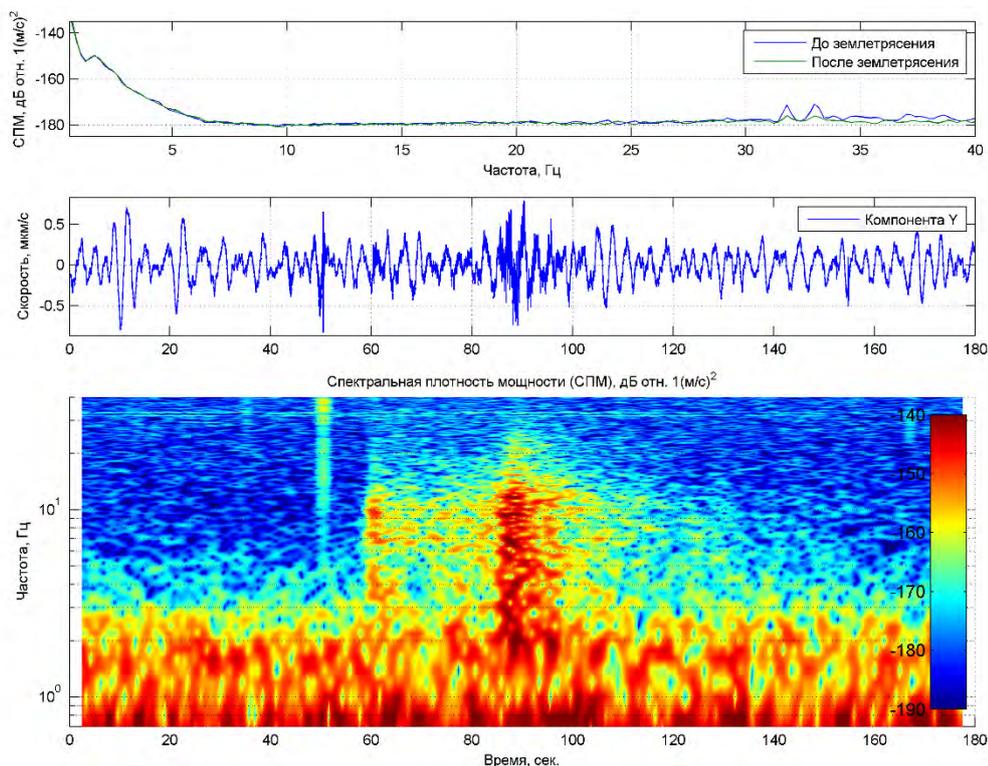


Рис. 4. Спектральный состав микросейсм до и после землетрясения 25.07.2014 г. вблизи озера Удиль

Обозначения. Порядок рисунков и их расшифровка аналогичны Рис. 2.

### Обсуждение результатов и выводы

Исследованием частотно-временных параметров слабых землетрясений установлены качественные и количественные соотношения спектральной плотности мощности сейсмических волн, отличающиеся по частотному составу на северо-восточном обрамлении системы разломов Тан Лу и центральной его части. Одной из причин выявленных различий может быть влияние геологического строения земной коры вблизи пунктов наблюдений.

С точки зрения современной сеймотектоники плотина и водохранилище Бурейской ГЭС расположены в границах Чжангуанцайлин-Туранского плутоногенного комплекса,

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

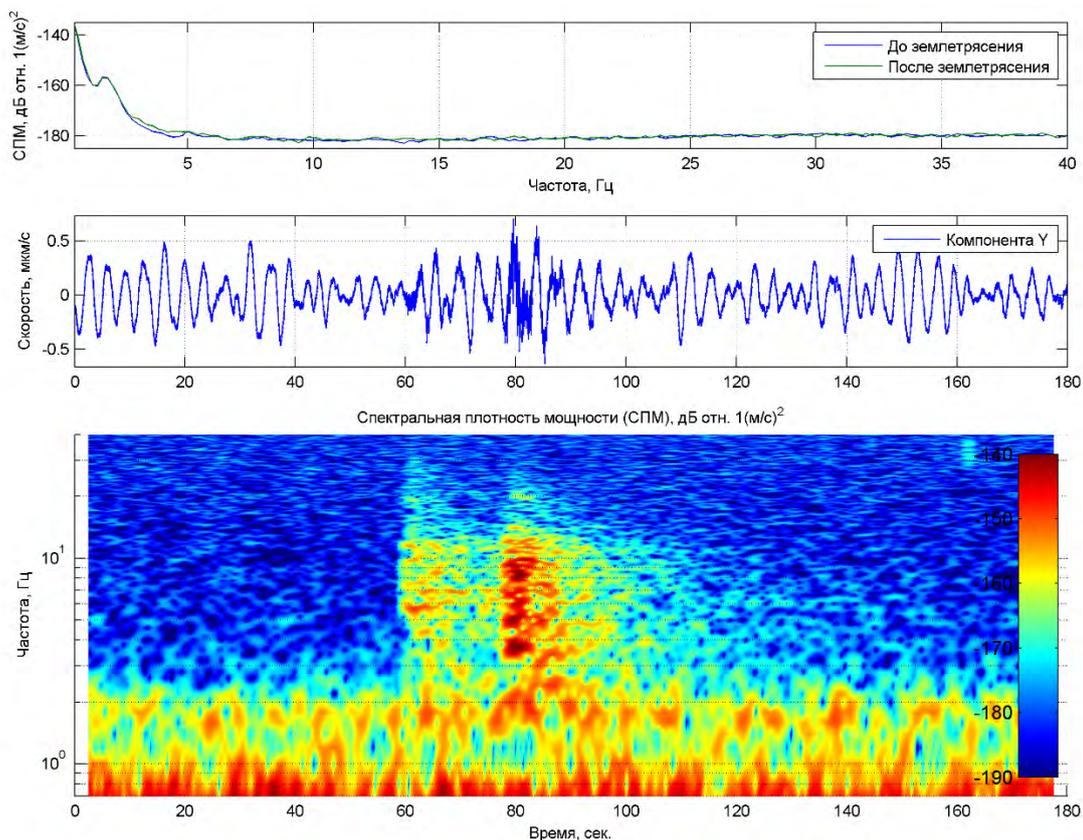


Рис.5. Спектральный состав микросейсм до и после землетрясения 26.07.2014 г. вблизи озера  
Удиль

Обозначения. Порядок рисунков и их расшифровка аналогичны Рис. 2.

который представляет собой уникальный в своем роде гранитоидный пояс, простирающийся в меридиональном направлении на 1000 км при ширине 200-250 км с западными ответвлениями на севере и юге [1]. Размеры блоков вблизи плотины составляют от первых сотен метров до километров. Резонансная частота возбуждения для данного масштаба неоднородностей составит порядка 10 Гц и менее. На спектрограммах (Рис. 2, 3) максимум спектральной мощности приходится на частоту 12.5 Гц. Для сдвиговых деформаций при скорости  $S$ -волн 3.5 км/с резонансное взаимодействие волны возможно на неоднородностях, протяженностью  $3.5/12.5=0.35$  км. Для  $P$  волны «сжатие-расширения» этот параметр будет равен 0.7 км. Таким образом, размеры неоднородностей геологической среды, определенные по геологическим данным и длина волны возбуждения находятся в сопоставимых соотношениях. Следствием этого и может быть объяснен эффект возбуждения геологической среды на высоких частотах вблизи пунктов регистрации. Причем спад спектральной плотности мощности после прохождения  $S$ -волны происходит от низких частот к верхним. Данный эффект требует более детального изучения, в связи с возможным техногенным влиянием плотины на геологическую среду и обратного эффекта влияния резонансного возбуждения геологической среды на автоволновые процессы плотины.

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

Пункт регистрации озера Удыль расположен в зоне относительного сейсмического затишья, на одной из ветвей Амурского разлома, в системе новейших впадин. Активная фаза разгрузки тектонических напряжений в данной области относится к периоду первых десятилетий XX века [2]. Блоковая делимость данного региона обусловлена более крупными неоднородностями земной коры, что и может определять смещение резонансных частот возбуждения в низкочастотную часть спектра.

При землетрясениях, а также, вследствие влияния приливных сил, на границе блоков земной коры возникают деформационные волновые процессы [5]. Эти процессы инициируют вторичную сейсмическую активность [3, 6]. Блоковая структура земной коры [4] определяет пространственную длину волны данных процессов [6] и, следовательно, несколько резонансных частот возбуждения среды, зависящих от размеров блоков, скорости распространения  $P$ ,  $S$  и поверхностных волн. Наблюдаемый «противоположный» пункту «Буряя» эффект спада спектральной плотности мощности после прохождения  $S$ -волны (Рис. 4, 5) от верхних частот к низкому более закономерному явлению, так как коэффициент затухания как правило пропорционален частоте.

Авторы выражают искреннюю благодарность ведущему научному сотруднику института тектоники и геофизики ДВО РАН Трофименко С.В. за полезное обсуждение результатов данного исследования.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований ДВО РАН «Дальний Восток» (проект 15-И-2-014).

### **Список литературы**

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации м-ба 1:1 000 000. (третье поколение). Дальневосточная серия. М.: ВСЕГЕИ. 2012.
2. Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М. Сейсмогеодинамика Алдано-Станового блока // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 1. С. 5-17.
3. Трофименко С.В. Суточные и годовые циклы сейсмической активности сейсмических поясов Северо-Востока Азии в модели блокового строения земной коры // Вестник СВФУ. 2011. Т. 8. № 1. С. 55-63.
4. Трофименко С.В. Тектоническая интерпретация статистической модели распределений азимутов аномалий гравимагнитных полей Алданского щита // Тихоокеанская геология. 2010. Т. 29. № 3. С. 64-77.
5. Trofimenko S.V., Bykov V.G. Model of crustal block movement in the South Yakutia geodynamic testing area based on GPS data // Russian Journal of Pacific Geology. 2014. Vol. 8. № 4. pp. 247-255. DOI: 10.1134/S1819714014040071.
6. Trofimenko S.V., Bykov V.G., Merkulova T.V. Seismicity migration in the zone of convergent interaction between the Amur plate and the Eurasian plate // Journal of Volcanology and Seismology, 2015, Vol. 9, No. 3, pp. 210-222. DOI: 10.1134/S0742046315030069.

УДК 550.344

## **ИЗУЧЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ И ДРЕВНИХ ДЕФОРМАЦИЙ В ЗОНАХ РАЗЛОМОВ МОНГОЛИИ**

**<sup>1</sup> Серебренников С.П., <sup>2</sup> Батсайхан Ц.**

*<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, e-mail:  
serebr@crust.irk.ru*

*<sup>2</sup>Исследовательский центр астрономии и геофизики АН Монголии, г Улаанбаатар*

Представлены результаты изучения тектонических нарушений на территории Монголии. Изучение разломов проводилось геологическими и геофизическими методами. Для исследований были выбраны структуры, которые задокументированы геологическими методами с различной степенью детализации. Рассмотрены основные изменения параметров геофизических полей при нарушениях естественной «сплошности» в осадочных и коренных породах. Полученные данные позволили выявить тектонические нарушения в широком разнообразии геоморфологических форм рельефа, расширить зону разломов, определенную геологическими методами, оценить их качественные и количественные характеристики.

Ключевые слова: геофизические методы, разломы, палеосейсмодислокации, блоковое строение

## **STUDY OF MODERN AND ANCIENT DEFORMATIONS IN THE FAULT ZONES OF MONGOLIA**

**<sup>1</sup>Serebrennikov S.P., <sup>2</sup>Batsaikhan Ts.**

*<sup>1</sup>Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, 128, Lermontova Str., serebr@crust.irk.ru*

*<sup>2</sup>Research Centre of Astronomy and Geophysics MAS, Ulaanbaatar*

Here are the results of study of tectonic dislocations in Mongolia. The faults have been studied by the geological and geophysical methods. The studies have been conducted into the structures geologically documented on different levels of detail. Consideration is being given to major alterations in geophysical field parameters when there is a break in continuity of sediments and solid rocks. The obtained data have allowed identifying tectonic dislocations among a wide range of relief forms, extending investigation of the geologically determined fault zone, and making qualitative and quantitative assessment of the dislocations.

Keywords: geophysical methods, faults, paleoseisodislocations, block structure.

При исследовании очаговых зон возможных сейсмических событий особое место отводится разрывным нарушениям. Проводится их картирование, уточняется пространственное размещение и морфология, оценивается тектоническая активность в недалеком прошлом и в настоящее время.

***ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ***

Исследуемый регион расположен в северной и центральной части территории Монголии. Высокая сейсмичность, наличие тектонических структур предопределило проведение геологических и геолого-геофизических исследований.

Результаты геофизических исследований зон разрывных нарушений в указанном направлении представляются на материалах изучения морфоструктурных особенностей сейсмогенных разломов Монголии (Могод, Гуджин). Указанные тектонические нарушения изучены с различной степенью детальности, они имеют различные структурные особенности, морфологию и расположены в различных геологических и геоморфологических ситуациях. Их объединяет лишь сейсмогенное происхождение – от установленного до предположительного. Нарушения естественной «сплошности» среды как осадочных, так и коренных пород, какими являются разломные зоны, приводит к изменению параметров геофизических полей. Меняются их электрические и упругие свойства, поэтому степень их изменений может оцениваться с помощью геофизических методов.

Исследования электрических и упругих параметров грунтов на участках разломов, задокументированных геологическими и геоморфологическими методами, были направлены как на решение методических вопросов, так и на получения необходимого набора данных для изучения условий залегания и строения тектонических нарушений.

Изучение данных структур позволило получить обширный материал для методологических исследований и практического применения при сейсмическом районировании.

На примере Могодского разлома, как наиболее изученного геологическими методами, мы представим возможности малоглубинной геофизики. Разрывные нарушения структуры выделяются по линиям равных значений скоростей, отмечающих несогласное залегание слоев, они приходятся на изменения скоростей в рыхлых грунтах до глубины 7 м. наиболее показательными являются схемы равных значений скоростей, построенные для глубин 5; 10 и 15 м., здесь есть возможность выделить участки или «блоки» с относительно однородными грунтами. Для рассматриваемого разлома, информативен срез скоростей на глубине 10 м. от поверхности. Необходимо сразу отметить, что данная структура является уникальным полигоном для отработки различных методов малоглубинной геофизики. Геофизические исследования проводились по системе профилей, расположенных в крест простираения главного тектонического нарушения, образовавшегося при Могодском землетрясении. Зона тектонического разрыва выходит на дневную поверхность и хорошо сохранилась благодаря низким темпам эрозии и своим деформационно-прочностным параметрам.

В комплекс геофизических исследований зон разломов входит малоглубинная сейсморазведка с ударным возбуждением сейсмических волн, с целью детального изучения

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

скоростей распространения сейсмических волн в верхней 20-метровой толще грунтов. Сейсморазведочные данные (сейсмограммы) интерпретировались путем построения годографов Р и SH волн и построением по ним скоростных. На основе геолого-геофизических разрезов для каждого пункта зондирования проводилось построение скоростного разреза через всю зону разлома. Разлом отчетливо выделяется на профиле скоростного разреза. В приповерхностной части разреза отчетливо выражена сама зона разлома и два блока, смещенных относительно друг друга. С глубиной ширина зоны тектонического нарушения несколько больше, и предполагается, что она более близка к истинной, так как отмечается в коренных породах.

Возможность уточнить зону тектонического нарушения, в пределах которой произошло Могодское землетрясение, с видимым выходом разрыва на современную поверхность, появилась в 2004 году. На одном из участков разлома представилась возможность увеличить протяженность геофизического профиля от области современного выхода разрыва на поверхность при землетрясении 1967 г. При интерпретации сейсморазведочного профиля, на удалении более 100 м от основной оси тектонического разрыва 1967 г., обнаружена более древняя тектоническая структура, в несколько раз более широкая, чем современная. Необходимо отметить, что на поверхности не обнаружено никаких морфоструктурных следов данной зоны геоморфологическими и геологическими методами, учитывая, что прошедшие десятилетия с сейсмического события 1967 г. практически не изменили следы сильного землетрясения на поверхности. На рисунке 1 представлен этот профиль 2004 года.

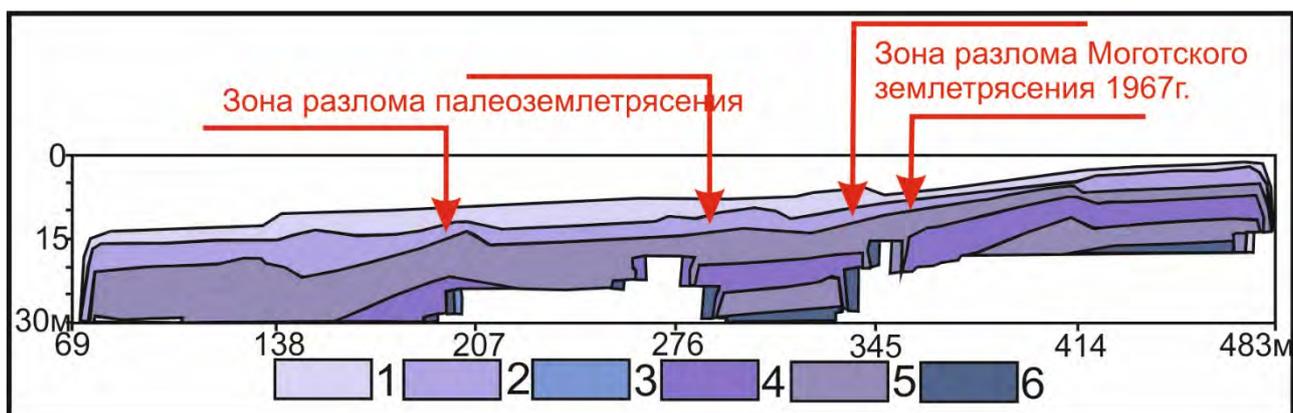


Рис. 1 Сейсморазведочный разрез через зону разлома

Проведенные исследования в 2014 г. позволили дополнительно обнаружить следы прошлых землетрясений в Могодской зоне лишь фрагментарно и на различном удалении от оси разрыва 1967 г. Если зону возможного палеоземлетрясения можно уточнить геофизическими методами, то возраст структуры возможно определить лишь

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

сейсмогеологическими методами.

Параллельно сейсморазведочному профилю на участке пересечения зоны разлома расположен электроразведочный профиль. Пункты сейсмо- и электроразведочных работ в большинстве случаев совпадали, и их привязка осуществлялась с помощью GPS-геодезии. Использовался метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Точность измерений не менее 5-10%, обеспечивалась путем повторных замеров, а также независимым контролем сравнения данных измерений на соседних точках.

Электроразведочный метод позволяет нам выявить тектонические нарушения из широкого разнообразия геоморфологических форм рельефа, а обнаружив их, оценить их качественные и количественные характеристики. Результаты интерпретации кривых ВЭЗ для тектонических нарушений, позволяющие выделить структурные особенности и оконтурить область тектонического нарушения Могодского, представлены на рисунке 2.

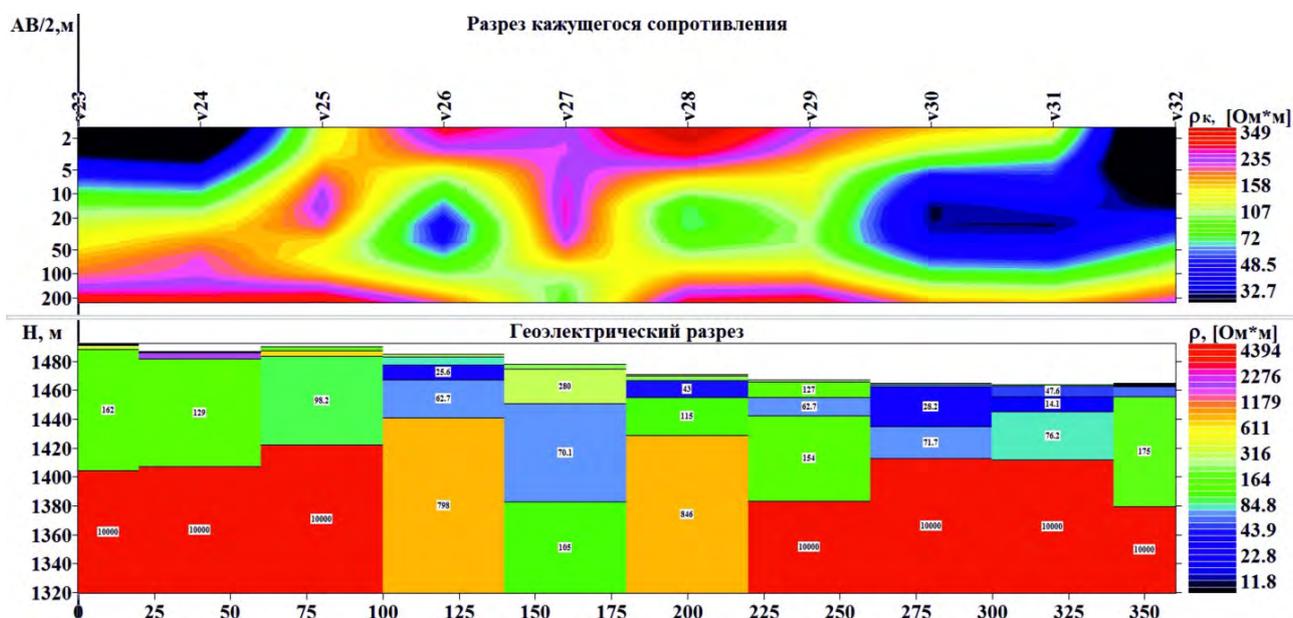


Рис. 2 Разрез кажущегося сопротивления и геоэлектрический разрез по профилю №3, Монголия, Могод, 2014 г.

В период 2010-2014 гг. вблизи г. Улан-Батор проведены геологические и геофизические исследования на предмет уточнения наличия на территории города, а в сущности агломерации города, тектонических нарушений, формирующие уровень сейсмической опасности в настоящее время (Джурик, 2012; Serebrennikov, 2012). На первом этапе геофизические профили были установлены на месте проведения сейсмогеологических работ (вскрытие предполагаемой зоны разлома с поверхности).

Целью расположения профилей было уточнение полученных результатов геологических исследований (2010 г.) и общей тектонической ситуации правого склона

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

долины. На следующем этапе геофизические профили были расположены таким образом, чтобы изучить тектоническую структуру обоих бортов долины ручья.

В первую очередь были обработаны материалы по левому борту, это связано с необходимостью проверить наличие зоны разлома, перекрытого склоновыми отложениями. Полученные результаты позволяют утверждать следующее: зона тектонического нарушения на разрезах выделяется уверенно, что говорит о её непосредственном существовании в данном месте (Рис. 3).

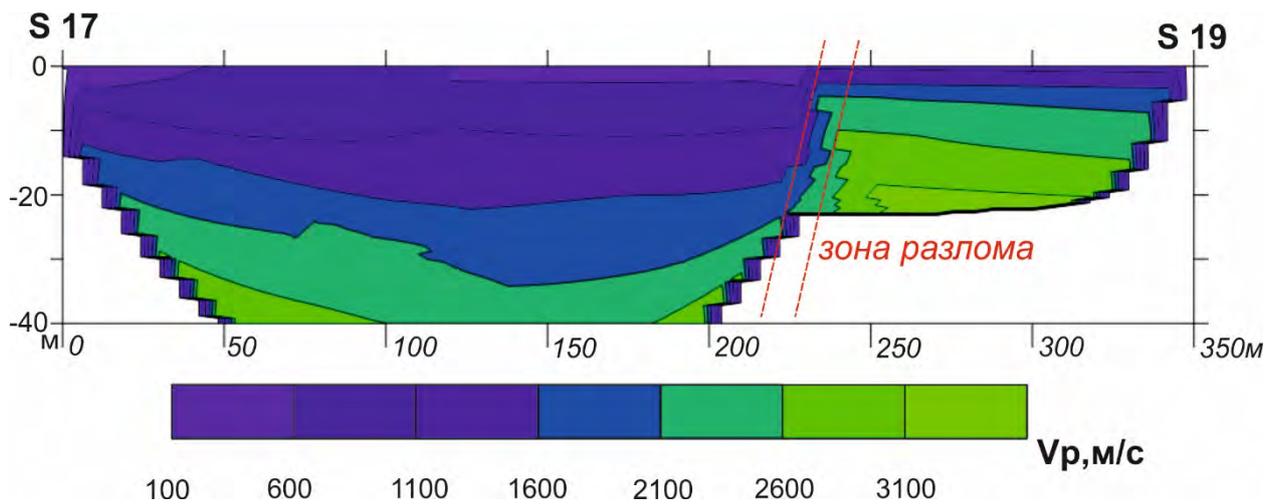


Рис. 3. Сейсморазведочный разрез левый борт руч. Гуджин

В заключении, необходимо отметить, что выбранный комплекс мало- и среднеглубинной геофизики в сочетании с геологическими методами изучения достаточно четко определяет ослабленные зоны, в частности зоны разломов, можно и необходимо использовать для их непосредственного изучения, как в единичных случаях (микросейсмораионирование), так и важных тектонических объектов.

### Список литературы

Джурик В.И., Ескин А.Ю., Серебренников С.П., Брыжак Е.В., Усынин Л.А., Батсайхан Ц. Выявление зон разломов и ослабленных участков горных пород в районах Монголии с помощью малоглубинной геофизики. – Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. Выпуск 7. Труды IX Российско-Монгольской конференции «Солнечно-земная физика и сейсмогеодинамика Байкало-Монгольского региона». – Иркутск: Институт солнечно-земной физики СО РАН, Институт земной коры СО РАН, 2012. – С. 60-63.

Serebrennikov S.P., Dzhurik V.I., Usynin L.A., Eskin A.Yu., Bryzhak E.V., Batsaikhan Ts. Geological-geophysical approach to the recognition of fault zones near the city Ulaanbaatar and their consideration in seismic zoning of site areas. – The 9<sup>th</sup> General Assembly of Asian seismological commission abstract book, September 17-20, 2012 – Ulaanbaatar, Mongolia. – P. 273-275.

УДК 550.348

**СИНТЕЗ ИСХОДНОГО СИГНАЛА ДЛЯ ПРОГНОЗА СЕЙСМИЧЕСКИХ  
ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОСНОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ СООРУЖЕНИЙ С УЧЕТОМ  
ДЕГРАДАЦИИ МЕРЗЛОТЫ**

**Брыжак Е.В., Ескин А.Ю., Шагун А.Н.**

*Институт земной коры СО РАН, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, e-mail: bryzhak@crust.irk.ru*

Опыт инженерно-сейсмологических исследований, проведенных в пределах криолитозоны, показывает, что если методика прогноза сейсмических воздействий в баллах для естественного состояния мерзлых грунтов достаточно обоснована [1], то расчет основных параметров прогнозных акселерограмм, на случай деградации мерзлоты, требует совершенствования [2]. Реализация одного из подходов решения поставленной задачи дается на примере обоснования сейсмической опасности линейного сооружения на юге Якутии (проектируемая трасса железнодорожного пути от станции Икабьекан (БАМ) до Тарыннахского ГОКа). В данной статье основное внимание уделяется количественной оценке параметров вероятных сильных землетрясений и формированию исходных сигналов.

Ключевые слова: максимальные ускорения, резонансные частоты, сейсмическая опасность, сильные землетрясения, акселерограммы, метод микросейсм, частотные характеристики.

**THE SYNTHESIS OF SOURCE SIGNAL FOR THE PREDICTION OF SEISMIC  
EFFECTS ON THE BASE OF LINEAR STRUCTURES WITH THE DEGRADATION OF  
PERMAFROST**

**Bryzhak E.V., Eskin A., Shagun A. N.**

*Institute of the Earth Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 128,  
Lermontova Str., e-mail: bryzhak@crust.irk.ru*

Experience of the engineering and seismological researches conducted in the presence of permafrost shows that the technique of calculations of seismic effects for the natural condition of frozen soil is rather proved, but the calculation of the main parameters of synthetic accelerograms in case of permafrost degradation demands improvement. Realization of one of approaches to resolve this problem we give on the example of justification of seismic hazard of linear constructions (the South of Yakutia) of the planned 180 km railway line «Ikabyekan station-Tarynnakhsky mining». This article focuses on the quantitative assessment of the parameters of possible large earthquakes and the formation of the source signals.

Keywords: maximal accelerations, resonance frequency, seismic hazard, earthquakes, accelerogram, microtremor method, frequency characteristics.

***ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ***

При формировании исходного сейсмического сигнала необходимо учитывать местные условия и возможность использования записей сильных событий, зарегистрированных вне рассматриваемого региона, в том числе и мировой сетью. Разработка такого способа особенно важна для тех сейсмически активных регионов, где инструментальные записи сильных движений имеются в ограниченном количестве или где сеть станций записи сильных движений почвы еще не полностью сформирована. Теоретическая основа, отвечающая вышеперечисленным требованиям, опирается на теорию восстановления сигналов и изображений по фазовым характеристикам [1]. В отличие от имеющихся способов, в данном случае задается амплитудный спектр землетрясения с необходимыми параметрами, а фазовый спектр определяется по данным записей местных землетрясений и достаточно полно характеризует местные условия распространения сейсмического сигнала, поскольку учитывает как регулярную, так и случайную (рассеянную) составляющие. Вместе с тем, в пределах исследуемой площадки, пространственные вариации фазы предполагают некоторые различия в огибающих сейсмического сигнала, зарегистрированного в различных пунктах наблюдения. Поэтому задание исходного сигнала, в общем случае, сводится к ряду реализованных нами процедур, которые не противоречат имеющимся теоретическим и экспериментальным данным.

Определяется зона возможного сильного землетрясения. На основе сейсмологических и сейсмогеологических данных устанавливается наиболее вероятный тип подвижки в очаге. Из каталога или архивных материалов региональной сети сейсмических станций отбираются наиболее сильные землетрясения из интересующих нас зон ВОЗ. Далее производится разделение амплитудных и фазовых характеристик выбранных землетрясений с помощью прямого преобразования Фурье, то есть реализуется получение соответствующих амплитудных и фазовых спектров (в настоящей работе использована стандартная программа вычисления спектров сейсмических сигналов методом БПФ). После чего по амплитудным спектрам отобранных записей землетрясений находится средний амплитудный спектр.

Завершающим этапом является Фурье-синтез полученного среднего амплитудного спектра с фазовым спектром, полученным по местному землетрясению с помощью обратного преобразования Фурье. Поскольку среда выступает формообразующим фактором очагового импульса, то фазовый спектр, так или иначе, учитывает излучение очага. Рассеивающие характеристики сред при усреднении амплитудных спектров, отобранных сильных землетрясений по ансамблю нивелируются, а поглощающие характеристики усредняются и вряд ли сильно отличаются от средних для исследуемого региона, тем более, что ошибка при экспериментальном определении последних может достигать 100%. Здесь надо отметить, что если по каким-либо причинам необходимо более полно учесть рассеивающие составляющие

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

в синтезируемом сейсмическом сигнале, то вместо среднего амплитудного спектра можно использовать амплитудный спектр, полученный как огибающая, соединяющая соседние максимумы отдельных спектров используемых землетрясений.

В том случае, когда параметры выбранных землетрясений имеют значительный разброс по отношению к требуемым, приходится иметь дело с нормированными амплитудными спектрами с последующим приведением интенсивности полученного исходного сейсмического сигнала к реальному с помощью данных ОСР, ДСР [3] и инструментальной шкалы, или по нормативным средним.

Нами при задании исходного сигнала, по предложенной выше методике, использовались записи местных землетрясений (северо-восток БРЗ), которые по своим параметрам отвечали сильным землетрясениям из выделенных зон ВОЗ для исследуемого района. Но и в этом случае, наши возможности так же ограничены в статистических данных по записям относительно сильных землетрясений в районе строительства, но выбранные из них мы приводим на рисунке 1. Они и послужили основой для формирования исходного сигнала (табл. 1).

Основные параметры используемых землетрясений, отобранных для формирования исходного сигнала, сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Основные параметры используемых землетрясений Якутии

№ п/п	Дата и время	Коорд. эпиц.		К	М	Сейсмостанция, эпицентральное расстояние
		φ	λ			
1	10.11.2005 19-29-54.3	57.37	120.77	15.7	6.3	Чара, 160 км
2	11.12.2005 15-54-13.4	57.43	120.90	14.8	6.0	Чара, 170 км
3	14.12.2005 23-12-13.3	57.46	120.88	12.7	4.8	Юктали, 108 км
4	15.12.2005 10-58-18.2	57.41	120.92	12.4	4.7	Хани, 79 км
5	26.01.2006 16-57-15.2	57.40	120.90	13.1	5.1	Хани, 77 км
6	12.3.2006 15-15-38.6	57.44	120.91	12.0	4.4	Хани, 81 км
7	29.04.2006 06-06-1.7	57.47	120.99	11.8	4.8	Хани, 86 км

Энергетический класс землетрясений меняется от 11,8 до 15,7, эпицентральные расстояния от 77 до 170 км. Это, в какой-то степени, отвечает удаленности зон ВОЗ от трассы железной дороги (0-50 – 200 км). Значительные интервалы изменений имеют так же магнитуды, интенсивность землетрясений в баллах и другие параметры. Из этого следует, что каждая из рассмотренных характеристик имеет свои интервалы изменений, что свидетельствует о необходимости более обоснованного подхода к заданию исходного сейсмического воздействия и к оценке его изменения за счет неоднородностей в пунктах строительства ответственных сооружений.

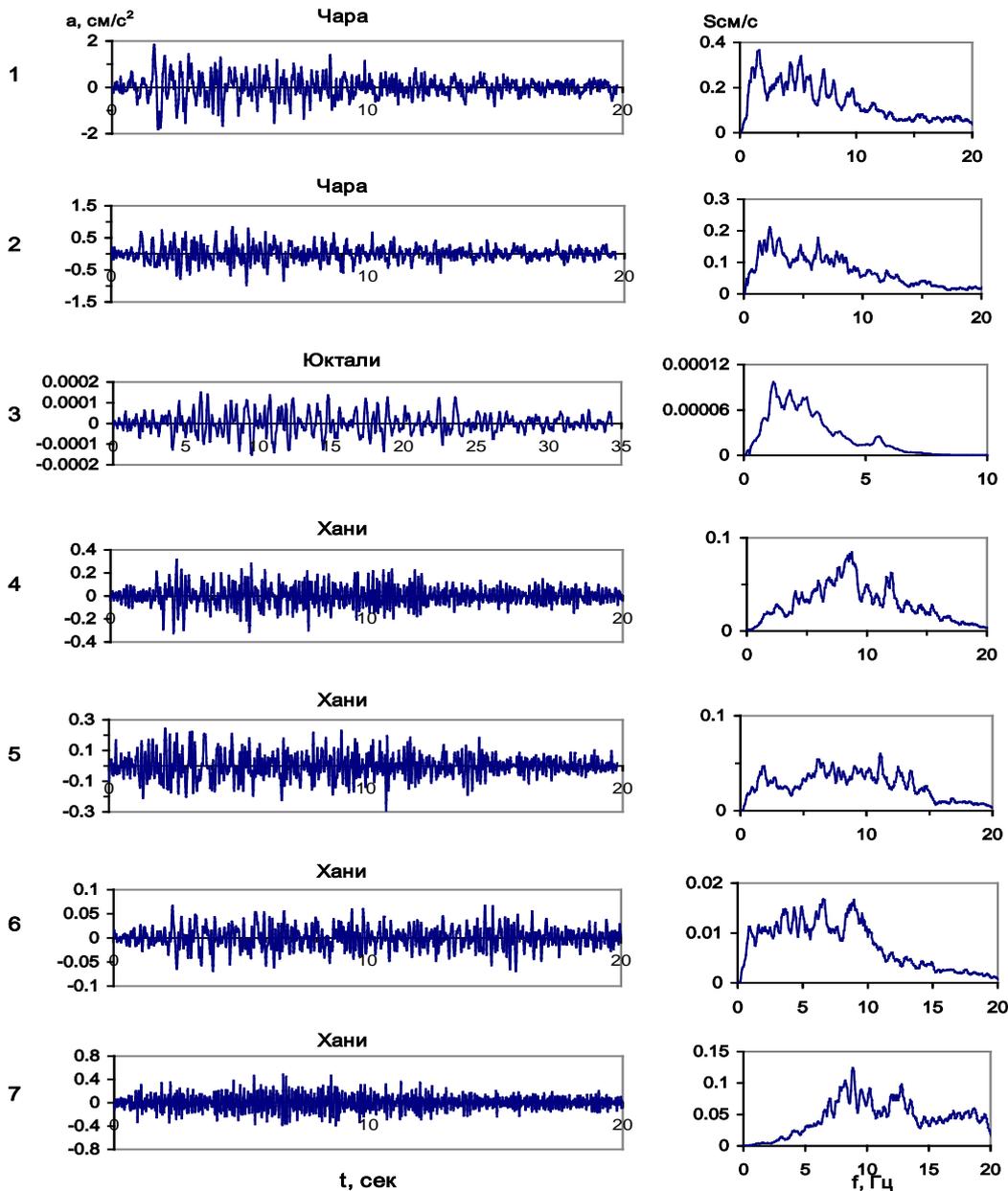


Рис. 1. Акселерограммы землетрясений и соответствующие им амплитудные спектры Фурье

Само задание исходного сигнала, основанного на записях местных землетрясений и данных сейсмологического анализа с указанием пределов в которых могут меняться параметры сильных землетрясений из выделенных зон ВОЗ, реализуется путем получения синтетических акселерограмм с помощью фазовой характеристики местного землетрясения (Рис. 2, Б) и огибающей нормированных амплитудных спектров (Рис. 2, А). Огибающая нормированных амплитудных спектров представляет сейсмический сигнал, как некоторую выборочную совокупность исследуемого класса сигналов, ограниченных параметрами, соответствующими ВОЗ. Результатом такого восстановления является акселерограмма, представленная на рисунке 2, В.

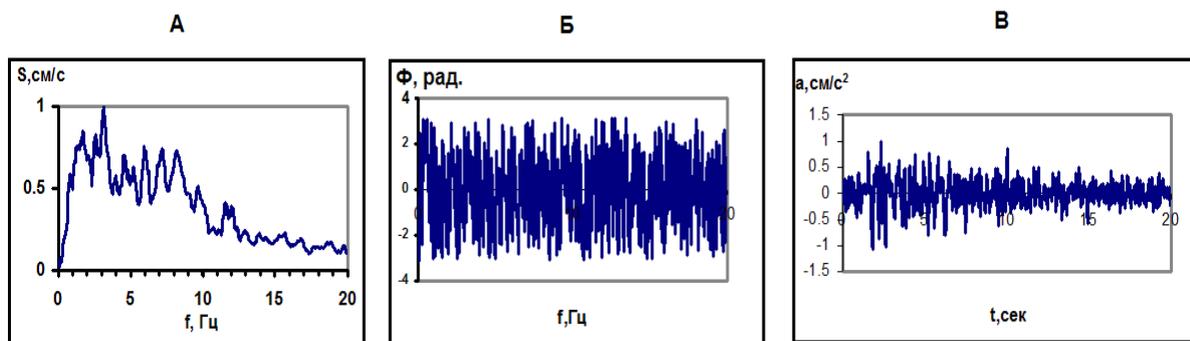


Рис. 2. А-средний нормированный спектр землетрясений, Б-фазовая характеристика, В-восстановленная акселерограмма

Синтезированный по изложенной методике сигнал (Рис. 2, В) использовался как исходный для наиболее вероятной сейсмической модели эталона для всей рассматриваемой 9-ти балльной зоны. Отмечается, что акселерограмма для модели эталона (Рис. 3) получена, согласно расчету колебаний, на поверхности и во внутренних точках среды, по программе Л.И. Ратниковой [4] и при использовании записей местных землетрясений [1; 5].

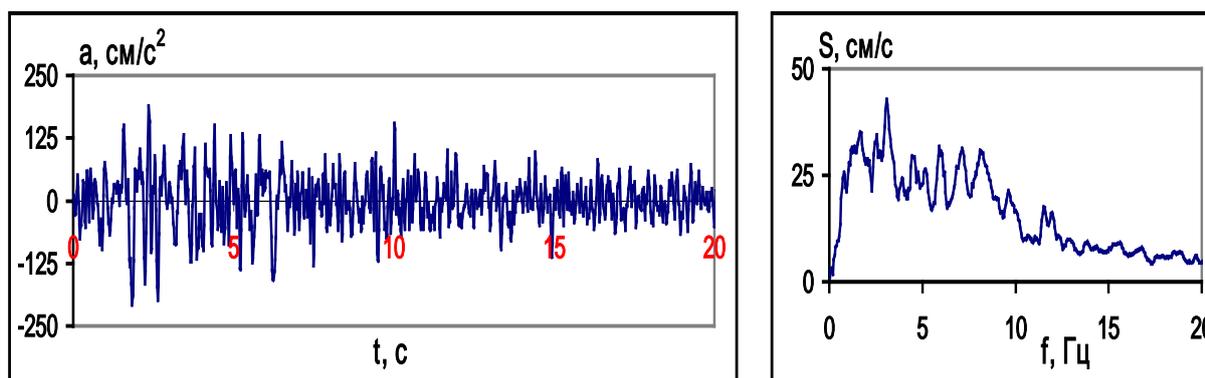


Рис. 3. Исходный сигнал для компоненты NS и его спектр

Основные параметры модели и сигнала следующие: мощность верхнего слоя 10 м, скорости сейсмических волн 2700 –  $V_p$  и 1450 –  $V_s$ , максимальное ускорение 208  $\text{cm/s}^2$ , максимум спектра 39  $\text{cm/s}$ , ширина спектра на уровне 0,5 от максимума меняется от 1 до 8 Гц, длительность колебаний на уровне 0,3 от максимума составляет 20 с. Указанные параметры исходного сигнала говорят о том, что он соответствует 8-ми балльному воздействию, а ширина спектра характеризует его соответствие как относительно далеким (максимумы спектра в основном в диапазоне 0-3 Гц), так и относительно близким (3-8 Гц) по эпицентральному расстоянию землетрясениям из выделенных зон ВОЗ. При проведении необходимых расчетов для линейных сооружений, расположенных в 8-ми балльной зоне синтезированный сигнал

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

(Рис. 3) необходимо масштабировать на 7-ми балльные воздействия для эталонных коренных пород.

В отношении выбора исходных «эталонных» сигналов для коренных пород, учитывая необходимость прогноза их параметров при переходе из мерзлого состояния в талое, необходим и анализ различий в сейсмических воздействиях при условии сохранения параметров исходного сигнала. Несмотря на то, что это специальная тема исследований, проведены конкретные расчеты, которые показывают степень их относительного несоответствия и возможность их использования в пределах погрешностей самих инструментальных методов.

Сформированные исходные сигналы имеют широкополосные спектры, в этом отношении важно проанализировать, как отмечено выше, различия в сейсмических воздействиях на основания линейного сооружения, когда они представлены «эталонными» коренными породами в мерзлом и талом состоянии. При этом, в качестве воздействия, используется землетрясение с такой же максимальной амплитудой, но с более выраженным пиковым характером его спектра в области низких частот (1-2 Гц). Низкий диапазон является наиболее опасным для инженерных сооружений, поскольку он обязан и максимальной энергии землетрясений, проявляемой на больших периодах колебаний [6].

Модели «эталонных» различаются только значениями скоростей в верхнем 10-ти метровом слое: мерзлые 3000 м/с –  $V_p$  и 1600 м/с –  $V_s$ ; талые 2800 м/с –  $V_p$  и 1560 –  $V_s$ , при равном значении отношений  $V_p/V_s$ . Прогноз скоростей соответствует ранее установленным зависимостям для БСЗ между скоростями продольных ( $V_{pT}$  и  $V_{pM}$ ) и поперечных ( $V_{sT}$  и  $V_{sM}$ ) для талого (Т) и мерзлого (М) состояния [1]. Они имеют вид:

$$V_{sT} = 1,39V_{sM} - 1,30 \quad (1)$$

$$V_{pT} = 1,47V_{pM} - 2,76 \quad (2)$$

Результаты расчетов для мерзлого и прогнозируемого талого состояния коренных пород, представленных моделями 1 и 2 показывают, что их различия по ускорениям, максимуму спектров и по его спаду незначительны (Рис. 4). Различия отмечаются только по частотным характеристикам в области относительно высоких частот, то есть за пределами инженерного диапазона частот.

В отношении анализа проведенных теоретических расчетов делается вывод о том, что при выборе за «эталон» коренных пород с фиксированными значениями скоростей сейсмических волн, при расчетах сейсмических воздействий, необходимо учитывать и их состояние. Но если это твердомерзлые породы, то различия в их поведении, при одинаковых сейсмических воздействиях, не выходят за пределы погрешностей используемых методов

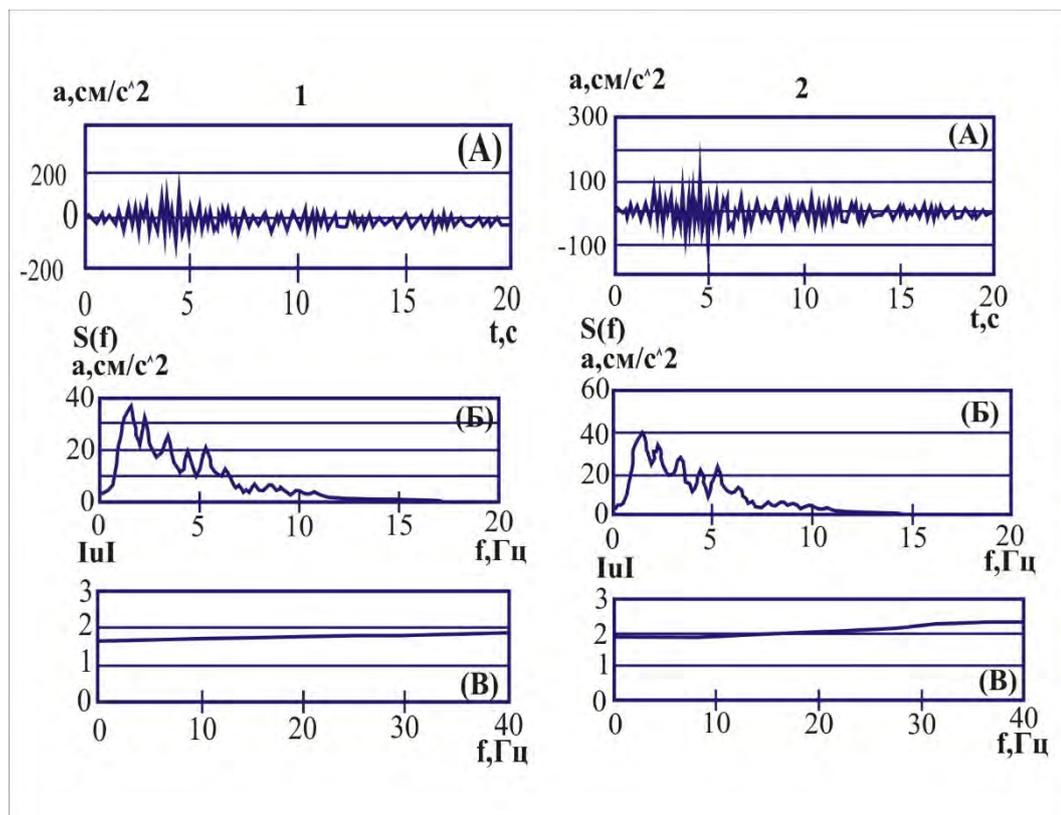


Рис 4. Акселерограммы (А), спектры (Б) и частотные характеристики (В) сейсмогрунтовой модели «эталона» для мерзлого (1) и талого (2) состояния

сейсмического микрорайонирования. Это подтверждают данные рисунка 4 и указывают на возможность использования для практических расчетов «эталонов», представленных моделями как талых, так и твердомерзлых пород. Для пластично-мерзлых коренных пород возможность их выбора в качестве эталонных ограничена и должна обосновываться степенью их трещиноватости, льдистости и прочности.

Полученные, в последнем случае сведения, об изменениях параметров колебаний эталонных грунтов при возможном их оттаивании учитываются при прогнозе сейсмических воздействий на линейные сооружения в случае деградации мерзлоты.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты № 14-05-00200 А и № 14-05-31359 мол\_а).*

### **Список литературы**

1. Джурик В.И., Дреннов А.Ф., Басов А.Д. Прогноз сейсмических воздействий в условиях криолитозоны. – Новосибирск: СО РАН, 2000. – 272 с.
2. Джурик В.И. Методика районирования параметров сейсмической опасности линейных сооружений по сейсмо-грунтовым моделям / В.И. Джурик, С.П. Серебренников, А.Ф. Дреннов, Л.А. Усынин // Криосфера Земли. – 2008. Том XII, № 4. – С. 66-76.

***ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ***

3. Методические рекомендации по сейсмическому микрорайонированию участков строительства транспортных сооружений МДС 22-1.2004/МИИТ. – М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 48 с.
4. Ратникова Л.И. Методы расчета сейсмических волн в тонкослоистых средах. – М.: Наука, 1973. – 124 с.
5. Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность: методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию [под ред. О.В. Павлова]. – М.: Наука, 1988. – 224 с.
6. Рекомендации по сейсмическому микрорайонированию при инженерных изысканиях для строительства. – М.: Стройиздат, 1985. – 73 с.

УДК 550.344

**ОСНОВЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИНЖЕНЕРНО-СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА  
ДЛЯ ТЕРРИТОРИЙ ВОСТОЧНОГО ФЛАНГА БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ  
И ЮЖНОЙ ЯКУТИИ**

**Джурик В.И.**

*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Лермонтова 128, e-mail: dzhurik@crust.irk.ru*

Рассматриваются вопросы решения практических задач сейсмического микрорайонирования и прогноза изменения инженерно-сейсмологических условий строительства в процессе освоения территорий с мерзлыми грунтами. Обобщаются результаты оценки максимальных сейсмических воздействий, с учетом состояния грунтов, для территорий восточного фланга БРЗ и Южной Якутии. Рассмотрены основные динамические параметры сейсмических сигналов и диапазоны их изменений для относительно сильных землетрясений. Получены экспериментальные взаимосвязи между основными сейсмическими параметрами преобладающих разновидностей грунтов для их различного состояния и установлена возможность их прогноза при деградации мерзлоты, на примере территорий Муйской и Чарской впадин.

Ключевые слова: Байкальская рифтовая зона, Южная Якутия, Чарская впадина, максимальные ускорения, резонансные частоты, криолитозона, прогноз.

**BASIS AND RESULTS OF ENGINEERING-SEISMOLOGICAL PREDICTION FOR THE  
EASTERN FLANK OF THE BAIKAL RIFT ZONE AND SOUTH YAKUTIA**

**V.I. Dzhurik**

*Institute of the Earth's Crust SB RAS, Lermontov Str., 128, e-mail: dzhurik@crust.irk.ru*

Consideration is being given to solving practical problems of seismic microzoning and predicting the change in engineering-seismological conditions during construction in permafrost areas. Generalization is made from the data on maximum effects from earthquakes for the eastern flank of the BRZ and South Yakutia with regard to ground conditions. The paper is concerned with the basic dynamic parameters of seismic signals and parameter variation ranges for relatively strong earthquakes. Experimental relationships have been obtained between the basic seismic parameters of the prevailing ground types for their different conditions, and a possibility has been found for the parameter predictions in permafrost degradation by the example of the Muya and Chara basins.

Keywords: Baikal rift zone, South Yakutia, Chara basin, peak accelerations, resonant frequencies, cryolithic zone, prediction.

## **Введение**

Вариации климатических условий земли, техногенные и природные факторы, является отражением изменения сейсмических свойств и физико-механических параметров мерзлых грунтовых служащими основаниями сооружений, независимо от их состава. Подобная реакция грунтов являются негативной для строительства и, в большинстве случаев, уменьшает прочностные свойства мерзлоты в основаниях сооружений. Это, в свою очередь, вносит свои коррективы в особенности проявления сейсмичности в верхней части криолитозоны и, поэтому, должны прогнозироваться для проектирования сейсмостойких сооружений в таких районах. Реализуемые в данной статье исследования, являются попыткой решения поставленных задач для конкретных территорий путем проведения теоретических расчетов на основе полученного нами набора необходимых взаимосвязей между сейсмическими параметрами по экспериментальным данным.

Рассматриваемый Восточный фланг Байкальской сейсмической зоны (БСЗ), начиная от северной части о. Байкал, включает серию впадин: Верхнеангарскую, Муйскую, Чарскую и районы южной Якутии. Они являются уникальными в природном отношении, где сочетаются распространения вечномерзлых грунтов и проявления высоко балльных землетрясений [12]. Возможная их интенсивность на территории Восточного фланга Байкальской сейсмической зоны оценивается в 8, 9 и более баллов [2]. Она подтверждается следующими статистическими данными за последние 50 лет.

Землетрясение 1725 года (расчетная магнитуда  $M=8$ , возможная интенсивность сотрясений (J) – до 11 баллов, площадь ощутимых колебаний около 4 млн. км<sup>2</sup>); Муйское - 1957г. ( $M=7,9$ ,  $J=11$  баллов, площадь сотрясений – 2 млн. км<sup>2</sup>); Олекминское землетрясение - 1958 г. ( $M=6,5$ ,  $J=8$  баллов, эпицентр расположен в бассейне среднего течения р. Олекмы, площадь ощутимых сотрясений оценивается в 450-500 тыс. км<sup>2</sup>); Тас-Юряхское – 1967 г. ( $M=7$ ,  $J=9-10$  баллов, ощущалось на расстоянии более 1100 км от эпицентра, площадь ощутимых сотрясений 1,3 млн. кв. км); Южно-Якутское - 1989 (8 баллов,  $M=6,6$ , ощущалось на площади 1,2 млн. кв. км и на расстоянии более 800 км от эпицентра). Макросейсмические последствия, наиболее сильных сейсмических событий второй половины XX века в пределах рассматриваемой зоны, сводятся к следующему: камнепады, сход лавин, трещины в стенах жилых и промышленных объектов, испуг и паника среди населения. Местность слабозаселенная, поэтому при землетрясениях жертв не отмечено. Анализ имеющихся сейсмогеологических материалов и данные о последних землетрясениях указывают на современную высокую сейсмическую активность территории в настоящее время.

В связи с планируемым освоением этих территорий (вторая волна строительства БАМ и Сила Сибири) возникает необходимость помимо детальных геолого-структурных и

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

сейсмологических исследований, направленных на уточнение исходной сейсмичности, проводить сейсмическое микрорайонирование территорий криолитозоны для естественного состояния грунтов и прогнозировать их изменение, в случае оттаивания грунтов, под воздействием климата и техногенеза.

**Результаты исследований и их анализ**

Ранее нами были проведены исследования динамики сейсмического риска на примере крупной геологической структуры Байкальской Рифтовой Зоны [3], которые выявили необходимость разработки новых и усовершенствования существующих подходов для прогноза изменения сейсмической опасности территорий промышленного и гражданского строительства. В развитие исследований в этом направлении на основе использования результатов режимных измерений сейсмических параметров мерзлых грунтов, выполненных на участках с различной степенью техногенного воздействия и в различных климатических зонах, были установлены экспериментальные уравнения. К настоящему времени они дополнены новыми измерениями, которые только подтвердили установленные ранее взаимосвязи и повысили их достоверность.

Это позволило получить общие представления о сейсмических свойствах наиболее распространенных грунтов северо-востока Сибири по наиболее вероятным их значениям (Рис.1). Установленная закономерность изменений основных параметров грунтов с учетом их состава и состояния, в дальнейшем использовалась для построения расчетных моделей и прогноза изменения скоростей упругих волн мерзлых (III) грунтов при переходе их в талое неводонасыщенное (I) или водонасыщенное (II) состояние. Сам прогноз обосновывается следующими экспериментальными уравнениями [4].

$$\begin{aligned} V_{PI} &= 0,3(V_{PIII} - 0,2T^{0,18}) - 0,47; \quad V_{PII} = 0,37(V_{PIII} - 0,2T^{0,18}) + 0,54; \\ V_{SI} &= 0,185(V_{SIII} - 0,14T^{0,53}) - 0,052; \quad V_{SII} = 0,164(V_{SIII} - 0,14T^{0,53}) + 0,103; \\ V_{PI} &= 1,05V_{PII} - 1,264; \quad V_{SI} = 1,18V_{SII} - 0,19. \end{aligned}$$

Приведенные переходные уравнения соответствуют преобладающим песчаным и гравийно-галечным грунтам с песчаным заполнителем. Наибольшие значения скоростей распространения продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) волн характерны для скальных грунтов. В мерзлых грунтах ( $V_p$ ) и ( $V_s$ ) во многих случаях значительно выше, чем в талых. Среди талых повышенными значениями скоростей обладают обводненные грунты. Как следствие отношение максимальных амплитуд колебаний исследуемых и эталонных грунтов при землетрясениях у талых грунтов больше чем у мерзлых, но значительно меньше, чем у водонасыщенных. Соответственно, сейсмическая опасность мерзлых грунтов меньше, или сравнима с талыми и зависит от их температуры (Рис. 1).

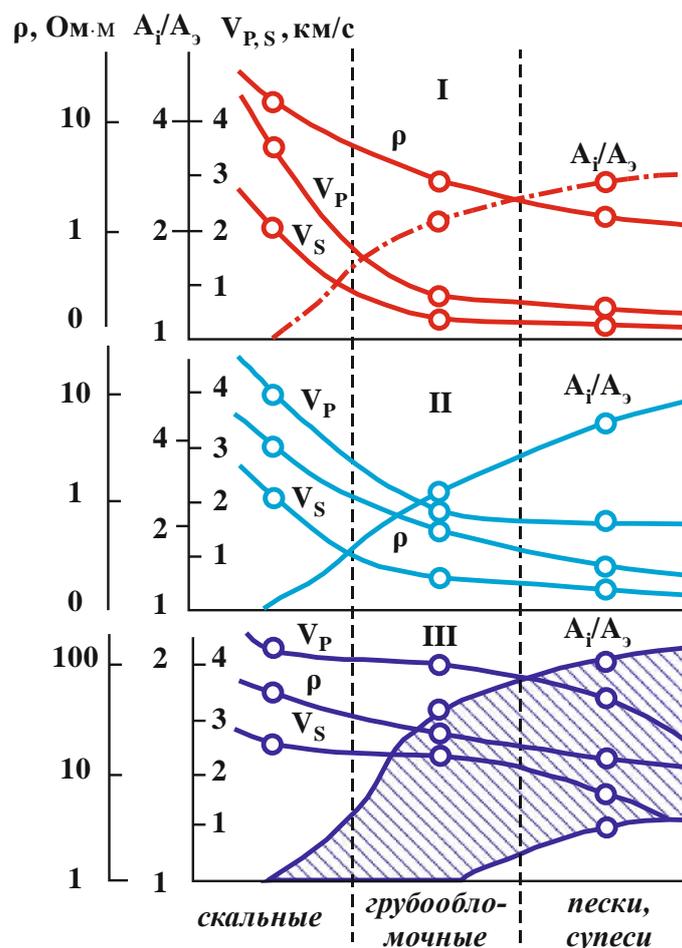


Рис.1. Изменение скоростей продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) волн, удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ) и отношения максимальных амплитуд ( $A_i/A_3$ ) в зависимости от состава и состояния грунтов северо-восточного фланга БСЗ

Для расчетов сейсмической опасности грунтов различного состояния в баллах использовалась зависимость приращений сейсмической балльности от акустических жесткостей ( $\rho V$ ) по формуле С.В. Медведева [8] и установленной нами зависимости приращений балльности от температуры мерзлого грунта ( $T$ ) и влажности-льדיстости ( $W$ ), согласно выражения:

$$\Delta I (WT) = Re^{-0,5T}(1-e^{0,17(W-5)}),$$

где  $T$  – температура мерзлых грунтов, взятая по модулю и  $W$  – влажность (льдистость). Выражение справедливо при  $W > 5\%$ .

В общем представленная зависимость показывает, что при малых значениях влажности 4-7% сейсмические свойства мерзлых грунтов не зависят от температуры. При повышении влажности до 15% увеличивается приращение балльности, обязанное температуре мерзлого грунта. И при влажности-льдистости большей 15%, величина  $\Delta I (T)$  стабилизируется, имея наибольшее значение, при температуре  $0^{\circ}$  и приближается к нулю при температуре ниже  $-4^{\circ}\text{C}$ .

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

Коэффициент  $R$  для песчаных и глинистых грунтов близок к единице, а для грубообломочных и валунных принимается равным, 0,5 [8].

В итоге отмечается, что сейсмическая опасность мерзлых грунтов меньше, или сравнима с талыми и зависит от их температуры [2]. Указанные закономерности изменения скоростей и сейсмической опасности в баллах в зависимости от состояния грунтов использовались при реализации прогноза максимальных сейсмических воздействий, в случае возможной деградации мерзлоты на участках С-В БСЗ, на примере Чарской впадины.

Чарская впадина представляет собой хорошо развитую тектоническую депрессию на восточном фланге БРЗ. Она вытянута с юго-запада на северо-восток на 120 км, имеет ширину 20-35 км. Северо-западный борт ее образован крутыми склонами хр. Кодар, с юго-востока она ограничена хр. Удокан, склоны которого плавно спускаются к днищу впадины. В Физико-географическом отношении Чарская впадина характеризуется суровыми климатическими условиями, она относится к районам сплошного распространения вечномерзлых грунтов [1]. Мощность мерзлой толщи по геотермическим расчетам во впадине превышает 100 и более метров при температуре от  $-1,5$  до  $-6$  °С. Мощность пластов инъекционного льда достигает 10-15 м, сквозные талики характерны для тектонических зон и встречаются под крупными озерами (Большое и Малое Леприндо), под руслами крупных рек (р. Чара) и некоторыми участками песчаных массивов (Урочище Пески). В горных сооружениях, обрамляющих впадину, мощность мерзлых пород может достигать 1000 и более метров (хр. Удокан и хр. Кадар на высоте 2000-2600 м) а их температура ниже  $-6^{\circ}\text{C}$  [10]. Сейсмичность Чарской впадины оценивается в 9, 9 и 10 баллов согласно ОСР-97 [7], а пределы, в которых могут меняться параметры сильных землетрясений из зон ВОЗ следующие: эпицентральное расстояние 0-100 км, магнитуда 6,5-7,8, глубина очага 10-20 км.

Чарская впадина, как и Байкальская характеризуется межвпадинными перемычками с меньшими высотами, чем окружающие их поднятия. Она соединяется с Муйской (запад) и Токкинской (восток) впадинами, образуя между собой протяженные ветвящиеся рифтовые долины. Мощность кайнозойских отложений в ней достигают 2300-2800 м, а абсолютные отметки поверхности фундамента опускаются до 1500-2500 м [9]. Под Чарской впадиной построены две преломляющие границы с  $V_{гр}=5,4$  и  $V_{гр}=5,8$  км/с.

Первая граница является поверхностью фундамента впадины. Ее положение и структурные особенности согласуются с построениями по гравиметрическим данным [6]. Вторая граница расположена на глубине 2-3 км и, по своей конфигурации, подобна поверхности фундамента. Ниже на глубинах 4-5 и 8-10 км идут изолинии скоростей 6,0 и 6,2 км/с [9]. В средней части земной коры установлен слой с пониженной до 6,0 км/с скоростью, ограниченной сверху и снизу изолиниями скоростей 6,3 и 6,4 км/с. Понижение скорости

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

составляет 0,3-0,4 км/с. На этих же глубинах выделены отражающие границы со средними скоростями 5,9 и 6.0 км/с.

Освоение территории впадины (БАМ, стационарные и промышленные поселки, подъездные пути к месторождениям, строительство ГОКов), приводит к более существенному изменению природной среды [2], поэтому решение вопросов прогноза сейсмических воздействий при деградации мерзлоты должно быть связано с прогнозом изменения мерзлотно-инженерно-геологических и гидрогеологических условий строительства планируемых объектов. Для решения главной задачи и исключения влияния неоднородностей при расчетах относительных сейсмических параметров грунтов необходимо построение сейсмических моделей трех уровней (Рис. 2).

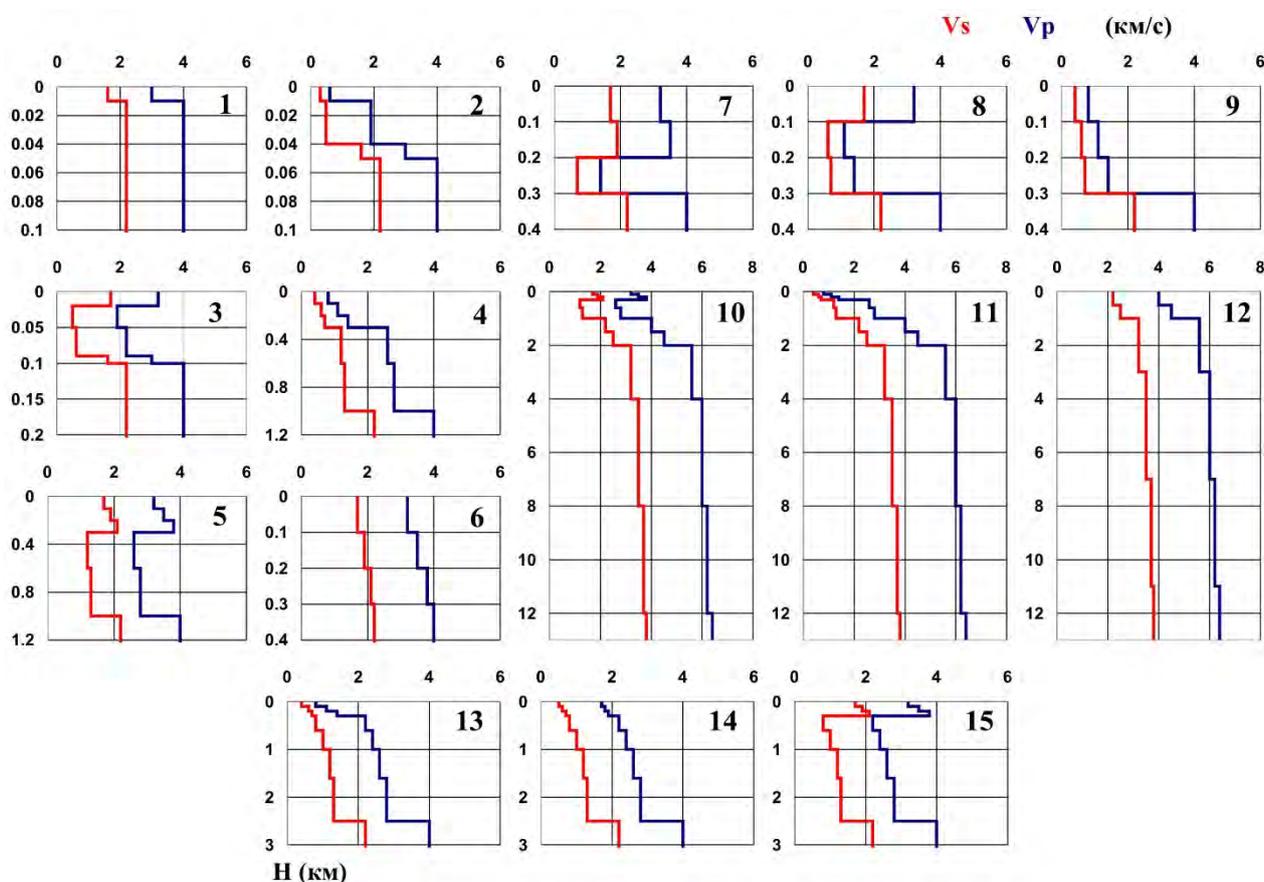


Рис. 2. Типовые сейсмогрунтовые модели для глубин 0,01-0,1 км (модели 1-5), от 0,01-3 км (модели 13-15) и до 12 км (модели 10-12)

Для первых двух (стадии ОСР и ДСР) это построение моделей до глубин в десятки километров (ОСР), в основном это данные (ГСЗ) для конкретных районов, различающихся по сейсмическим и геологическим условиям начиная с поверхности фундамента. На стадии ДСР могут использоваться имеющиеся сведения по среднеглубинной геофизики, для моделей, характеризующих зону выветривания и трещиноватые коренные породы (ДСР).

***ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ***

Третий уровень моделей соответствовал самой верхней части разреза, включающей слои рыхлых отложений, разрушенных полускальных и скальных пород, с учетом влияния гидрогеологических и мерзлотных условий территорий, а также ожидаемых техногенных изменений грунтов (СМР). Для построения обобщенных моделей этого уровня необходим большой объем измерений петрофизических характеристик грунтов на исследуемой территории с помощью малоглубинной геофизики. Далее обосновываются исходные сигналы, соответствующие вероятным сильным землетрясениям и проводятся теоретические расчеты [4-5].

В итоге изучено влияние глубинных и приповерхностных неоднородностей на расчетные параметры сейсмических воздействий и получены общие представления о сейсмических свойствах наиболее распространенных грунтов северо-востока БСЗ по наиболее вероятным их значениям (Рис. 1). Построены карты схемы сейсмического риска Чарской впадины для естественного и прогнозируемого состояния мерзлоты. Впадина разделяется на участки 8-9 баллов для естественного (мерзлого) состояния грунтов (Рис. 3) и для прогнозируемого талого состояния разделяется на участки 8, 9 и 10 баллов (Рис.4). Диапазон изменения максимальных ускорений в первом случае составляет  $160-420 \text{ см/с}^2$  и во втором  $160-900 \text{ см/с}^2$  – соответственно для естественного и прогнозируемого состояния грунтов.

Построение карт-схем максимальных ускорений для крупных геологических структур имеет в большей степени методический характер и в обобщенном виде характеризует динамику сейсмического риска при температурных изменениях в криолитозоне. Выявленная степень влияния слоев горных пород различного состояния, на исходные сейсмические колебания, проведенная через расчет спектральных характеристик, акселерограмм и спектров ускорений, показывают значительную изменчивость влияния верхних слоев грунтовых отложений на интенсивность и частотный состав землетрясений. Получена следующая закономерность: на сцементированных льдом мерзлых и коренных породах большой мощностью основные изменения исходного сигнала можно ожидать на частотах от 0,5 до 2,0 Гц. Максимумы частотных характеристик также смещаются в сторону низких частот. Деграция мерзлоты малой мощности приводят к усилению влияния приповерхностных неоднородностей, которые становятся значительными (сравнимыми с глубинными) на относительно высоких частотах.

Используя экспериментальные данные и теоретические расчеты, реализован подход к районированию сейсмической опасности, который заключается в представлении отдельных территорий, набором физических динамических моделей и в проведении для них расчетов необходимых величин. В результате в первом приближении построены карты-схемы

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

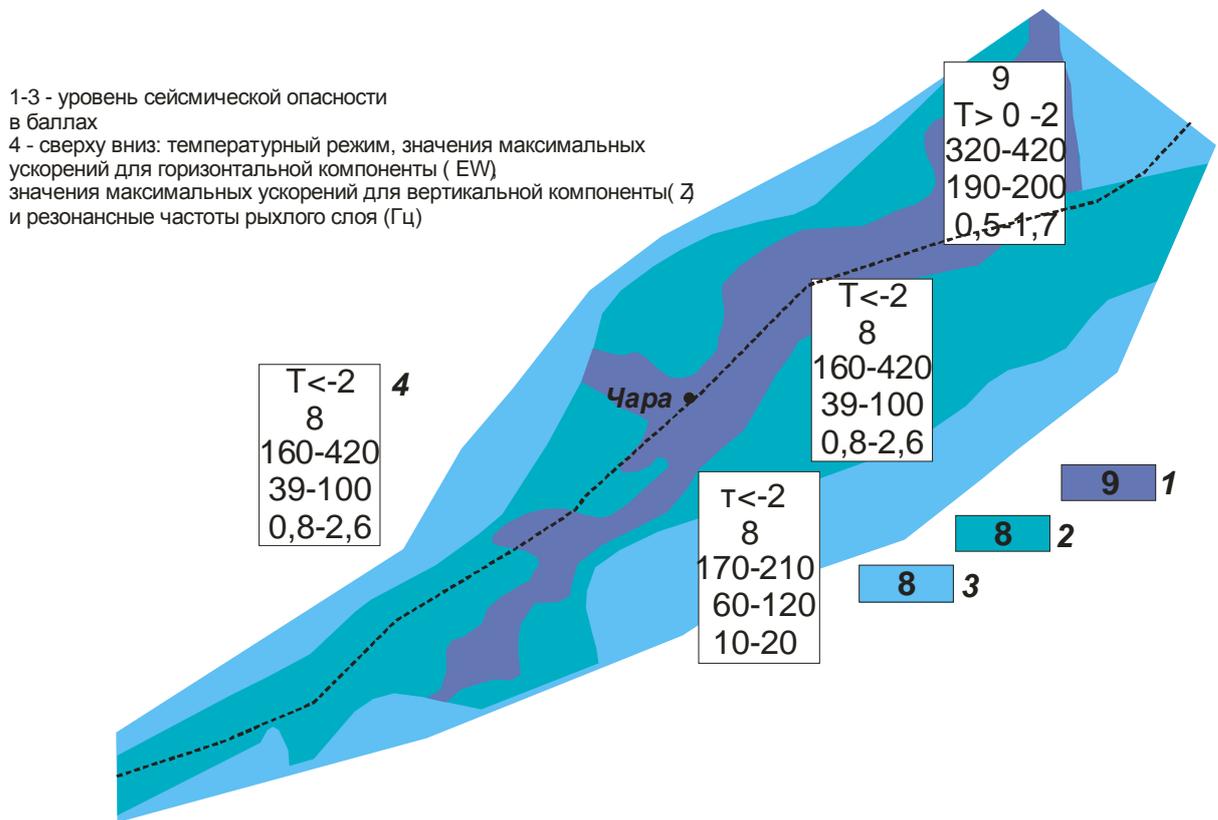


Рис. 3. Карта-схема максимальных сейсмических воздействий для естественного (мерзлого) состояния грунтов Чарской впадины

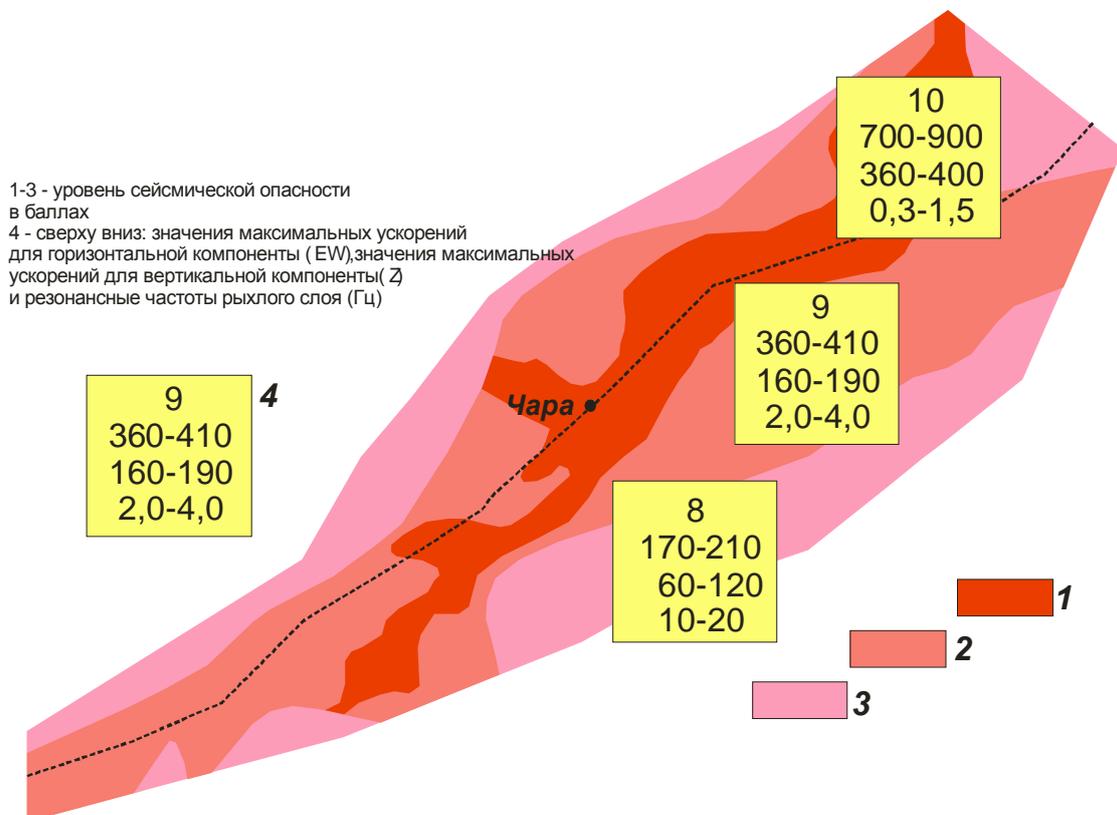


Рис. 4. Карта-схема максимальных сейсмических воздействий для прогнозируемого (талого) состояния грунтов Чарской впадины

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

максимальных ускорений (сейсмического риска) исследуемых крупных геологических структур для естественного состояния мерзлоты и на случай ее деградации. Тем самым работа направлена на прогноз изменения проявлений сейсмичности в криолитозоне и на возможность смягчения их последствий.

**Список литературы**

1. Геокриологические условия Забайкалья и Прибайкалья. М.: Наука, 1967. – 222 с.
2. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Инженерная геология и инженерная сейсмология. Новосибирск: наука, 1985. – 190 с.
3. Джурик В.И., Серебренников С.П., Дреннов А.Ф. Динамика сейсмического риска при температурных изменениях в криолитозоне. //Криосфера Земли. №4. Т.№9. 2003. – С. 37-40.
4. Джурик В.И. Сейсмогеологические, сейсмологические и инженерно-сейсмологические исследования лаборатории инженерной сейсмологии и сейсмогеологии ИЗК СО РАН // Геодинамика и тектонофизика. – 2014, Т.1, №1– С. 135–157.
5. Дреннов А.Ф., Джурик В.И., Серебренников С.П., Брыжак Е.В., Дреннова Н.Н. Основные параметры спектров ускорений при землетрясениях с  $M > 5$  для Байкальской Рифтовой Зоны // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56, №5. – С. 984-994.
6. Зорин Ю.А. Новейшая структура и изостазия Байкальской зоны и сопредельных территорий. М.: Наука, 1971. – С. 167.
7. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации, ОСР-97. М.: 1999. – 57 с.
8. Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. М.: Наука, 1988. – 300 с.
9. Недра Байкала по сейсмическим данным. Новосибирск: Наука, 1981. – 195 с.

УДК 504+338.49(57)

## **ЗАЩИТА СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ ОТ ПРИРОДНЫХ ОПАСНОСТЕЙ**

**<sup>1</sup>К.Г. Леви, <sup>1</sup>Е.А. Козырева, <sup>1</sup>А.И. Мирошниченко, <sup>2</sup>В.В. Чечельницкий, <sup>2</sup>Н.А. Гилева**

*<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, РФ*

*<sup>2</sup>Байкальский филиал геофизической службы СО РАН, г. Иркутск, РФ*

Рассмотрены способы превентивной защиты планируемых к строительству и строящихся ответственных элементов инфраструктуры Восточной Сибири. Для этого необходимо уже на стадии проектирования располагать знаниями о состоянии геологической среды, ее преобразованиях в природно-климатических условиях Сибири и прогнозировать ее возможную эволюцию в ближайшие десятилетия под действием опасных эндо- и экзогенных процессов, способных приводить к снижению устойчивости гражданских и технических сооружений. Рассмотрены основные факторы природной среды, приводящие к негативным социально-экономическим последствиям, подходы к построению карт районирования для ряда опасных природных процессов, дана сравнительная характеристика их энергий и дан прогноз возникновения опасных природных обстановок на базе исторического и инструментального мониторингов до 2050 г.

Ключевые слова: неотектоника, современные движения, активные разломы, сейсмичность, обвалы, оползни, сели, карты районирования, энергия природных процессов.

## **DEFENSE SOCIAL AND ECONOMICAL INFRASTRUCTURE EASTERN SIBERIA FOR NATURAL DANGERES**

**<sup>1</sup>K.G. Levi, <sup>1</sup>E.A. Kozyreva, <sup>1</sup>A.I. Miroshnichenko, <sup>2</sup>V.V. Chechel'nitzky, <sup>2</sup>N.A. Gileva**

*<sup>1</sup>Institute of Earth's crust SD RAS, Irkutsk, RF*

*<sup>2</sup>Baikalian brunch geophysical survey SD RAS, Irkutsk, RF*

The paper deals with the prevention and protection measures for critical infrastructure components planned and being under construction in East Siberia. This implies the design-stage need to understand the state of geological environment and its transformations under natural and climatic conditions of Siberia and to predict the probability of its evolution in the nearest decades under endo- and exogenous hazards that may result in reduced stability of industrial and civil buildings and facilities. Consideration is being given to the environmental factors that pose negative socio-economic impacts, approaches to generating zoning maps of natural hazards, comparable characteristics of their energies, and natural hazard prediction until 2050 based on historical and instrumental monitoring.

Keywords: neotectonics, modern movements, active faults, seismicity, collapses, landslides, mud flow, map of zoning, energy of natural processes

## **Введение**

В связи со всплеском освоения новых территорий в Сибири в начале XXI века, развитием минерально-сырьевой базы, открытием новых месторождений полезных ископаемых, подготовка к строительству горно-перерабатывающих заводов и энергетических производств, добычи и транспортировки нефти и газа ожидается интенсивное развитие социально-экономической инфраструктуры регионов в условиях широкого развития опасных природных обстановок. Поэтому ниже мы остановимся на способах превентивной защиты планируемых к строительству и строящихся ответственных элементов инфраструктуры. Для этого необходимо уже на стадии проектирования располагать знаниями о состоянии геологической среды, ее преобразованиях в природно-климатических условий Сибири и прогнозировать ее возможную эволюцию в ближайшие десятилетия под действием опасных эндо- и экзогенных процессов, способных приводить к снижению устойчивости технических сооружений. Мы рассмотрим основные факторы природной среды, приводящие к негативным социально-экономическим последствиям, подходы к построению карт районирования для ряда опасных природных процессов, дадим сравнительную характеристику их энергий и попытаемся дать прогноз возникновения опасных природных обстановок на базе исторического и инструментального мониторингов до 2050 г.

### **Опасные природные факторы и районирование территорий по степени опасности**

*Неотектонические движения земной коры и современные движения земной поверхности* – изучаются геологическими и геодезическими методами, количественно оцениваются в метрах, сантиметрах и миллиметрах за различные интервалы геологического и календарного времени. Для решения некоторых практических задач используют числовой показатель градиента скорости движений, являющийся характеристикой тектонических деформаций.

*Активные разломы* – картируются геологическими, геофизическими и геодезическими методами. Их количественными характеристиками являются толщина зон тектонической переработки горных пород субстрата, протяженность и глубина проникновения разлома в земную кору, амплитуды вертикальных и горизонтальных смещений крыльев разлома. Для решения ряда практических задач разломы ранжируют по длинам или оценивают плотность активных разломов на единицу площади.

*Сейсмичность* – является результатом активной деятельности разломов – прорастания в толще земная кора, тектонические перемещения по плоскостям сместителей. В практике обычно используют ряд числовых параметров, характеризующих энергию и интенсивность сейсмического процесса – площадную концентрацию эпицентров землетрясений различных энергетических классов (Рис. 1); скалярные значения сейсмического момента, характеристика

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

выполненной землетрясением «работы» по перемещению горных масс, распределение суммарной сейсмической энергии во времени и др.

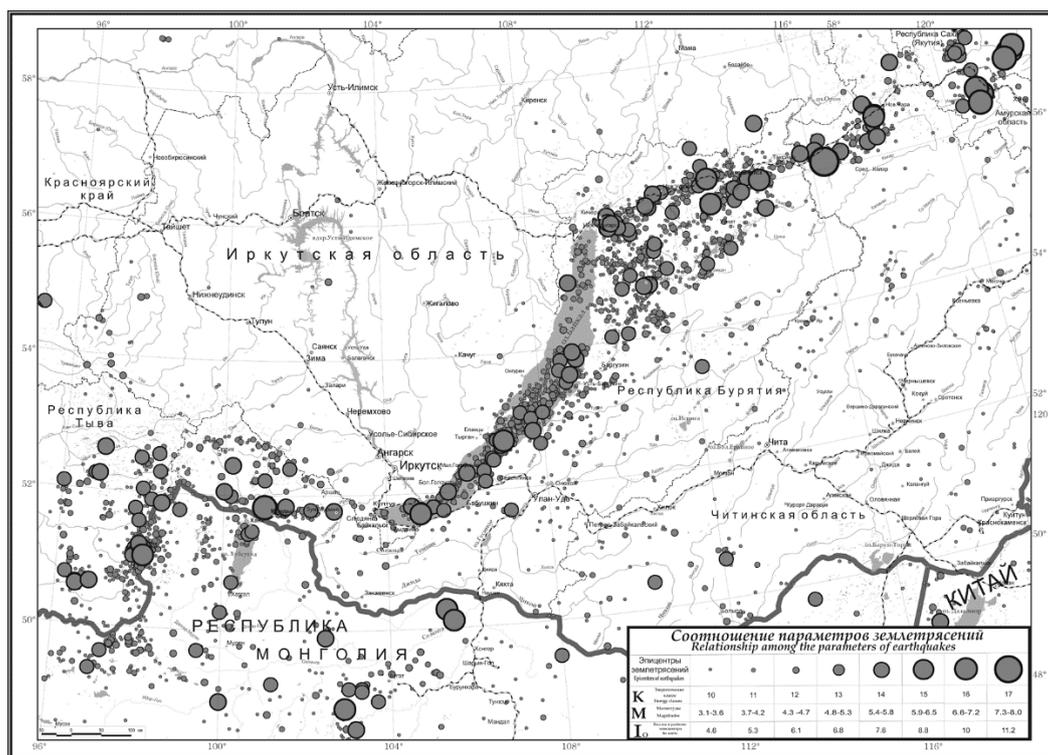


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Прибайкалья по данным сети сейсмических наблюдений [Карта..., 2005]

Данные сейсмологических и палеосейсмологических исследований ложатся в основу карт сейсмического районирования различной детальности (Рис. 2). В таблицах 1 и 2 приведены энергетические характеристики землетрясений и соотношения бальности, амплитуды скорости и ускорений колебаний по шкалам MSK-64 и MMSK-92, которые лежат в основе упомянутых карт.

Таблица 1

Сопоставление некоторых энергетических характеристик землетрясения с размером очага

<b>M</b>	3	4	5	6	7	8	9
<b>K</b>	9	11	13	15	17	18	20
<b>R, км</b>	0.5	1.0	3.0	10.0	20.0	50.0	150.0
<b>D, м</b>	0.001	0.01	0.05	0.2	1.0	5.0	50.0

где **M** – магнитуда землетрясения по Ч. Рихтеру, **K** – энергетический класс землетрясения, **R** – радиус очага в км, **D** – смещение по плоскости разрыва в м [Ризниченко, 1977]

Таблица 2

Бальность, MSK-64	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Aa, (% g), MSK-64	<0.15	0.21	0.43	0.85	1.74	3.5	7.1	14.1	22.8
Aa, (%g), MMSK-92	<0.07	0.11	0.28	0.7	1.75	4.4	11.0	28.0	70.0
Av, (см/с), MSK-64	<0.12	0.18	0.37	0.75	1.5	3.0	6.0	12.0	23.0
Av, (см/с), MMSK-92	<0.03	0.05	0.15	0.44	1.3	3.8	11.0	33.0	98.0

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

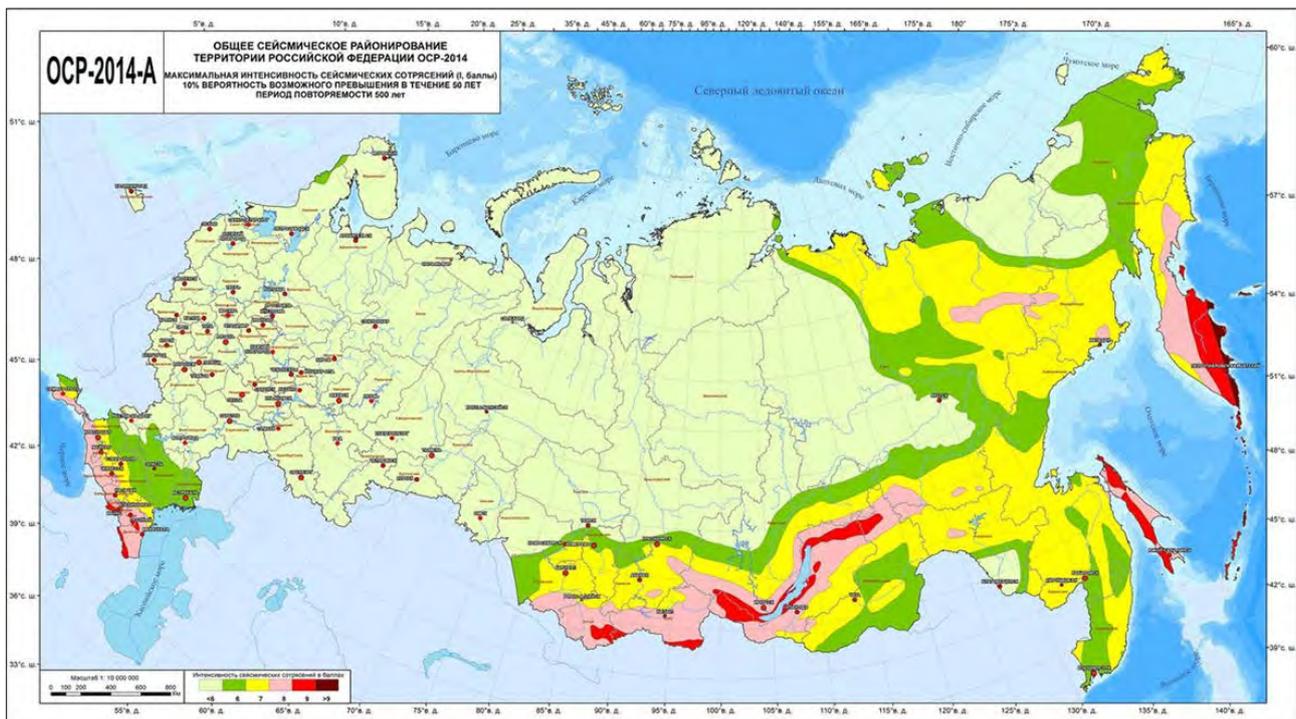


Рис. 2. Карта общего сейсмического районирования территории РФ ОСР-2014А

Однако кроме сейсмической опасности большое значение имеют опасные *экзогеодинамические процессы*, провоцируемые как сейсмичностью, так и атмосферными процессами. Как правило, при проектировании развития экономической инфраструктуры, составляются карты районирования различной детальности для отдельно взятых опасных процессов. Так при проектировании трассы ВСТО, был предложен подход к районированию путем наложения друг на друга карт эндо- и экзогеодинамических опасностей [Леви и др., 2007]. Для этого были составлены и согласованы между собой шкалы (Рис. 3) интенсивности проявления опасных процессов в системе баллов. Содержательная суть баллов приведена ниже.

$\gamma$	1			2		3		4		5		
$M_R$	0.6	1.4	2.1	2.8	3.6	4.2	5.1	5.8	6.6	7.2	8.2	8.8
$I_0$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Delta$	1					2		3				

Рис. 3. Сравнение шкал прогнозной опасности для инженерных сооружений от природных (экзо- и эндогенных) воздействий

6 – интенсивность воздействия эндогеодинамических факторов, баллы;  $M$  – магнитуды землетрясений (по Рихтеру);  $I_0$  – интенсивность сейсмических колебаний по шкале MSK-64, баллы;  $\Delta$  – интенсивность воздействия экзогеодинамических факторов, баллы. *Экзогеодинамические опасности:* 1 – **Низкая интенсивность** – единичные проявления различных типов процессов небольшой интенсивности; пораженность

## **ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ. НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

территории до 10%; редкие повреждения инженерных конструкций; **2** – **Средняя интенсивность** – многолетняя мерзлота сплошная или прерывистая, возможно развитие бугров пучения, морозная трещиноватость, просадочные явления в грунтах, развитие комплекса гравитационных явлений; пораженность территории до 25-30%; повреждения инженерных конструкций и сооружений; **3** – **Высокая интенсивность** – характерна для горных районов, широкое развитие обвалов, осыпей, оползней и снежных лавин, частый сход селевых потоков (раз в 3-4 года), проявления термокарста, пучения грунтов, солифлюкции; пораженность территории до 50% и более; частые и многочисленные повреждения инженерных конструкций

*Эндогеодинамические опасности:* **61** – **Крайне низкая интенсивность** – средние скорости неотектонических движений до 0.021 мм/год, число активных разломов до 7 единиц на элементарную площадку 10\*10 км<sup>2</sup>, скорость смещения в зонах разломов до 1 мм/год, слабосейсмичные области с возможными землетрясениями интенсивностью до 3 баллов, повреждения инженерных сооружений маловероятны; **62** – **Низкая интенсивность** – средние скорости неотектонических движений 0.021-0.06 мм/год, число активных разломов до 7-10 единиц на элементарную площадку 10\*10 км<sup>2</sup>, скорость смещения в зонах разломов до 2 мм/год, слабосейсмичные области с возможными землетрясениями интенсивностью до 4 баллов, очень слабые повреждения инженерных сооружений; **63** – **Средняя интенсивность** – средние скорости неотектонических движений 0.06-0.12 мм/год, число активных разломов до 10-15 единиц на элементарную площадку 10\*10 км<sup>2</sup>, скорость смещения в зонах разломов до 8-10 мм/год, области с возможными землетрясениями интенсивностью до 5-6 баллов, слабые повреждения инженерных сооружений; **64** – **Высокая интенсивность** – средние скорости неотектонических движений 0.12-0.20 мм/год, число активных разломов до 15-20 единиц на элементарную площадку 10\*10 км<sup>2</sup>, скорость смещения в зонах разломов до 10-18 мм/год, области с возможными землетрясениями интенсивностью до 6-8 баллов, существенные повреждения инженерных сооружений; **65** – **Очень высокая интенсивность** – средние скорости неотектонических движений  $\geq 0.20$  мм/год, число активных разломов до  $\geq 20$  единиц на элементарную площадку 10\*10 км<sup>2</sup>, скорость смещения в зонах разломов  $\geq 18$  мм/год, области с возможными землетрясениями интенсивностью  $\geq 8$  баллов, катастрофические повреждения инженерных сооружений. Пример карты приведен на рисунке 4.

### **Карты районирования по комплексу опасных процессов**

Казалось бы, районирование территорий по интенсивности проявления опасных процессов является рациональным в каждом конкретном случае, но при разработке стратегии освоения новых территорий желательно иметь карты районирования по комплексу опасных процессов. Такая работа была выполнена усилиями трех организаций ВНИИ ГО ЧС, ЦИЭКС и СЦ ИГЭ РАН в 2004 г. путем построения карты комплексного индивидуального риска от чрезвычайных ситуаций для населения Российской Федерации (Рис. 5) [Электронный ресурс, 2004: код доступа – <http://www.kommersant.ru/doc/2293632>]. Методика ее составления была разработана в 2002 г. [Методика оценки комплексного индивидуального риска ..., 2002]. По своей рисовке она схожа с картой общего сейсмического районирования ОСР-97 хотя и имеет некоторые отличия.

Другой вариант оценки комплексной опасности был изложен в [Леви, 1991] и детализирован в [Мирошниченко, Леви, 2014]. Факторы, характеризующие интенсивность опасных процессов, были проанализированы с помощью стандартного пакета программ «Факторный анализ». Это позволило получить карты комплексной природной опасности в различных масштабах от глобального до детального регионального.

Однако использование оценок опасностей в баллах вызывает некоторую неудовлетворенность, поскольку для тонких инженерных расчетов балл выглядит как очень грубая оценка.

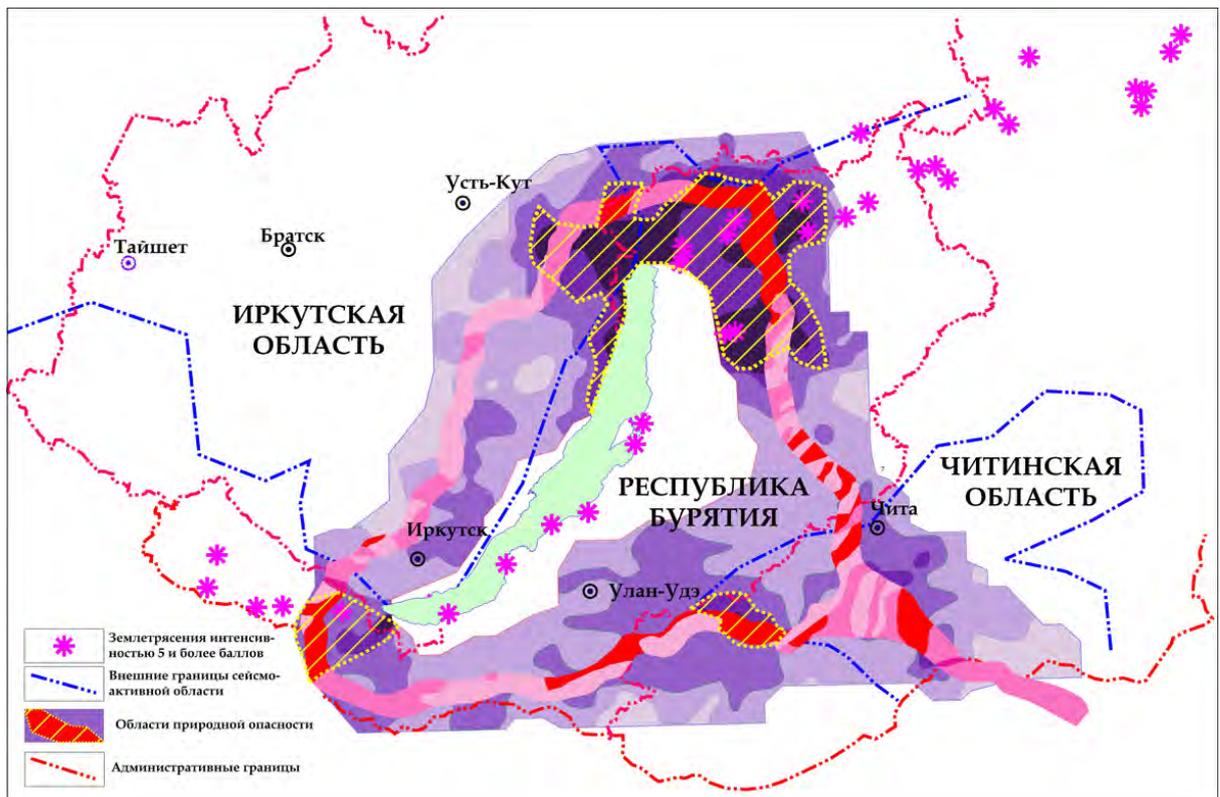


Рис. 4. Прогнозная карта опасности для инженерных сооружений от природных (экзо- и эндогенных) воздействий.

Условные обозначения на Рис. 3.

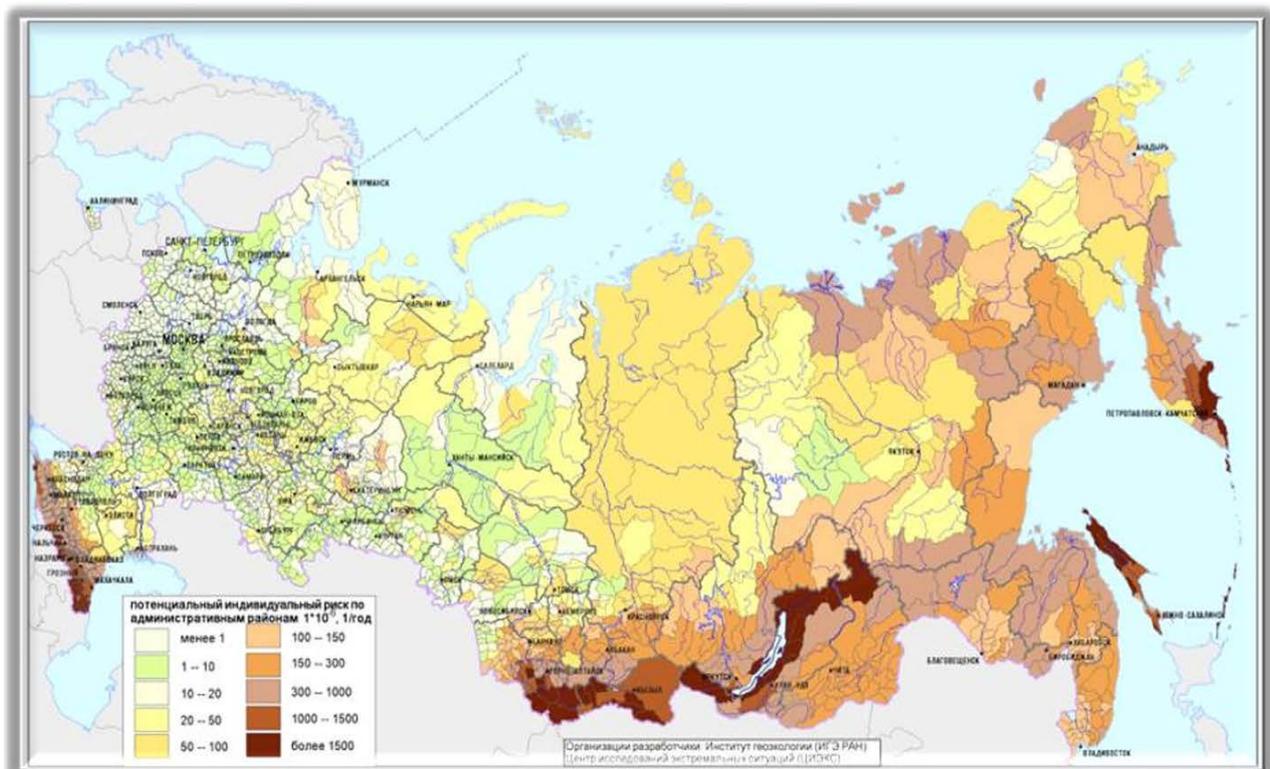


Рис. 5. Карта потенциального интегрального природного риска по административным районам Российской Федерации

Мы проанализировали различные варианты и пришли к выводу о том, что интенсивность проявления тех или иных опасных процессов целесообразнее отображать в единицах их энергий. Пример такой шкалы мы приводим на рисунке 6 [Задонина, Саньков, Леви, 2004].

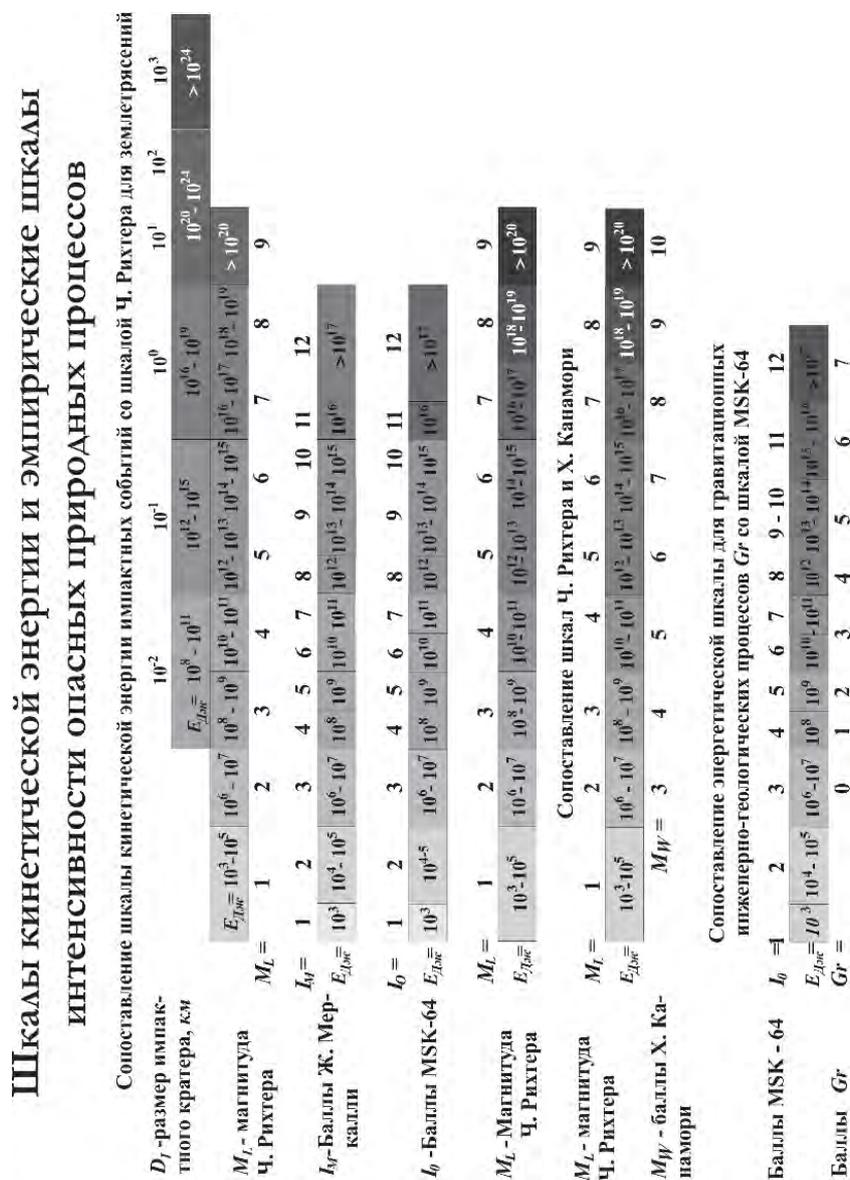
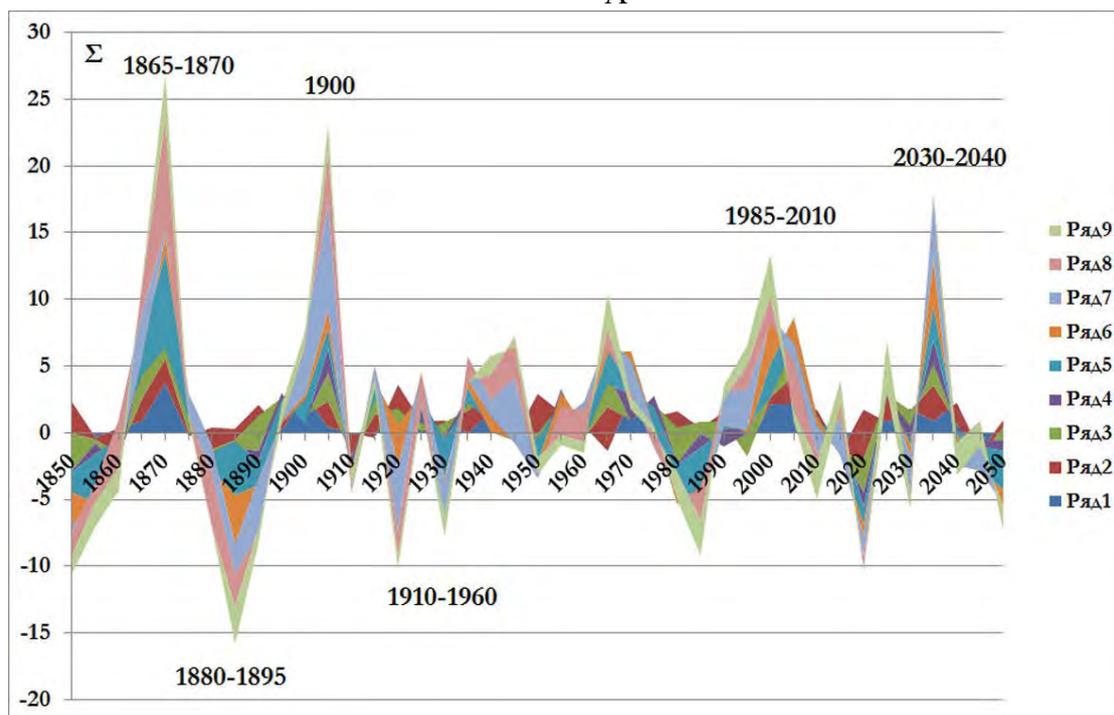


Рис. 6. Шкалы кинетической энергии и эмпирические шкалы интенсивности опасных природных процессов

В дополнение отметим, что, располагая данными исторического и инструментального мониторинга опасных природных процессов мы можем попытаться осуществить и среднесрочных прогноз их развития на ближайшие десятилетия. Рисунок 7 иллюстрирует пример подобного прогноза. Дело в том, что все природные процессы обладают собственной периодичностью и потому экстремальные ситуации могут возникать при совпадении максимумов и минимумов активности сразу у нескольких опасных процессов. Именно совпадение гармоник и приводит к возникновению негативных и опасных ситуаций.

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

А



В

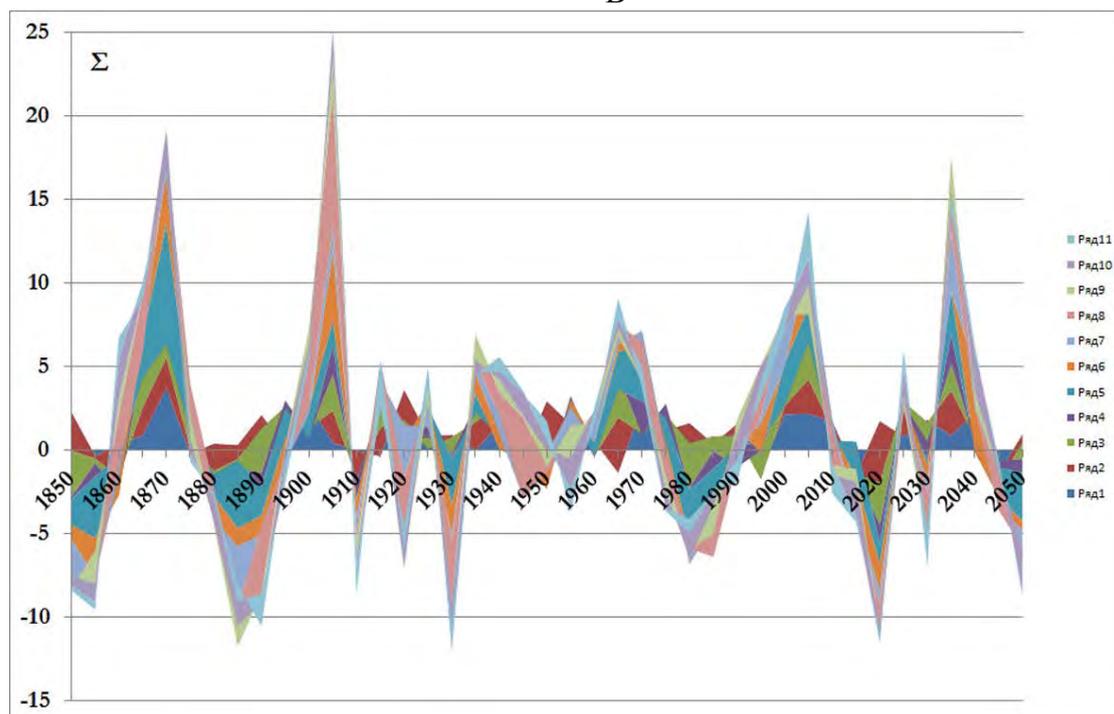


Рис. 7. Прогнозная модель, характеризующая активизацию экзогенных процессов под действием атмосферного массопереноса (А) и атмосферного массопереноса + сейсмичности (В) на юге Восточной Сибири в интервале 1850–2050 гг.

Расшифровка рядов: характеристика атмосферной циркуляции по Гирсу: **1** – число дней с ветрами западных румбов в год; **2** – число дней с ветрами восточных румбов в год; **3** – число дней с ветрами меридиональных румбов в год; **4** – вариации солнечной активности по годам; **5** – число сообщений о количестве наводнений в год; **6** – годовые суммы осадков; **7** – среднегодовая температура приземного слоя атмосферы в °С; **8** – количество сообщений о сходах селевых потоков в год; **9** – средняя высота стояния уровня оз. Байкал по годам; **10** – суммарное число сейсмических событий в год; **11** – суммарное количество выделившейся сейсмической энергии в год. Значения всех величин – относительные единицы.

### **Заключение**

Таким образом, мы рассмотрели известные способы предвидения развития опасных природных процессов с использованием анализа ретроспективных данных. Пришли к выводу о полезности различных видов опасностей в отдельности для решения конкретных региональных проблем защиты элементов инфраструктуры регионов. Для стратегического планирования освоения территорий более интересны способы комплексного районирования по совокупности опасных природных явлений. Одновременно мы предлагаем оценивать проявления опасных процессов в реальных и общепринятых физических единицах их энергий. Кроме того, мы предлагаем дополнять статичные модели перечисленных карт районирования дополнительными кривыми среднесрочного прогноза развития опасных природных процессов на базе нелинейной статистики. Доклад иллюстрируется различными графическими примерами.

### **Список литературы**

Задонина Н.В., Саньков В.А., Леви К.Г. Современная геодинамика и гелиогеодинамика. Природные катастрофы и организация превентивных мероприятий при чрезвычайных ситуациях. Книга 4. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2004. – 86 с.

Карта эпицентров землетрясений Восточной Сибири, произошедших за период 1950-2005 гг. / Ред. Леви К.Г., Масальский О.К. Авторы: Ружич В.В., Гилева Н.А., Задонина Н.В., Масальский О.К. – Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН. – 2005.

Карта комплексного индивидуального риска от чрезвычайных ситуаций для населения Российской Федерации. – М.: МЧС РФ, 2004. – Электронный ресурс, 2004: код доступа – <http://www.kommersant.ru/doc/2293632>

Леви К.Г. Неотектонические движения в сейсмоактивных зонах литосферы. Тектонофизический анализ. – Новосибирск: Наука, 1991. – 166 с.

Леви К. Г., Мирошниченко А.И., Козырева Е.А., Кадетова А.В. Модели эволюции озерных бассейнов Восточной Сибири в позднем плейстоцене и голоцене // Известия Иркутского государственного университета. Археология и геоэкология. Серия «Геоархеология. Этнология. Антропология». – 2014. (в печати).

Леви К.Г., Тржцинский Ю.Б., Козырева Е.А. К оценке комплексного риска на примере деформаций и разрушения трубопроводных систем в условиях Восточной Сибири / Проблемы современной сейсмологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии. Матер. Всерос. совещ. с международным участием. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007. – С. 203-209.

Методика оценки комплексного индивидуального риска чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера / Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций (ВНИИ ГО ЧС), Центр исследований экстремальных ситуаций (ЦИЭКС), Сейсмологический центр Института геоэкологии РАН (СЦ ИГЭ РАН). – М., 2002. – 34 с. (Электронный ресурс: код доступа [aso33.ru>download/307](http://aso33.ru/download/307))

Мирошниченко А.И., Леви К.Г. Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ / Тезисы докладов Всероссийского совещания с участием приглашенных

***ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ***

исследователей из других стран (г. Иркутск, 11 - 16 августа 2014 г.) / ред. кол.: К. Ж. Семинский (отв. ред.) и др.-  
Иркутск: ИЗК СО РАН, 2014. – 165 с.

Природные опасности России. Экзогенные геологические опасности. Тематический том / под редакцией  
В.М. Кутепова, А.И. Шеко. – М.: «КРУК», 2002 – 348с.

Ризниченко Ю.В. Расчет скорости деформации при сейсмическом течении горных масс // Изв. АН СССР.  
Физика Земли. – № 10. – 1977. – С. 23-31.

УДК 550.343.6 + 622.831.32

## **ТЕХНОГЕННЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ПРОГНОЗ ОБРУШЕНИЙ НА ЖЕЗКАЗГАНСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ**

<sup>1</sup> Герман В.И.

<sup>1</sup> ГПМК «Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья»  
(ГПМК «КНИИГиМС»), 660049, Красноярск, пр. Мира, 55, e-mail: german3v@yandex.ru

Рассмотрен опыт прогноза обрушений на Жезказганском медном месторождении и приведены данные о техногенных землетрясениях, индуцированных горными работами на нем. Показано, что эффективным средством контроля за текущим состоянием выработок является сейсмический мониторинг. Совместный анализ пространственно-временного и энергетического распределения регистрируемых сейсмических событий с применением современных физических представлений о процессе разрушения горных работ позволяет прогнозировать обрушения.

Ключевые слова: прогноз обрушений, техногенные землетрясения, параметр сближения сейсмических событий

## **EARTHQUAKE CAUSED BY MINING AND COLLAPSES FORECASTING ON ZHEZKAZGAN COPPER DEPOSIT**

<sup>1</sup> Victor I. German

<sup>1</sup> Krasnoyarsk Research Institute of Geology and Minerals, 660049, Russia, Krasnoyarsk, Mira av.,  
55, e-mail: german3v@yandex.ru

The experience of the collapses forecasting on the Zhezkazgan copper deposit is considering. Information about man-made earthquakes induced by mining on the deposit is given. It is shown that seismic monitoring is an effective tool to control the current state of excavations. Analysis of the space-time and the energy distribution of recorded seismic events based on modern physical concepts to the process of rack failure allows to forecast collapses.

Keywords: collapses forecasting, man-made earthquakes, parameter of seismic events convergence

### **Введение**

Жезказганское медное месторождение расположено в юго-западной части Центрального Казахстана и известно со времен Геродота. Активное его освоение началось в 50-х годах XX века. Подземные выработки месторождения занимают участок 10x10 км и уходят на глубину до 650 м. Месторождение преимущественно обрабатывалось камерно-столбовой системой.

### **Техногенные землетрясения на Жезказганском месторождении**

Ведение горных работ на Жезказганском месторождении (ЖМ) индуцировало возникновение мощных техногенных землетрясений. Сильнейшее из них произошло 1 августа 1994 года и имело магнитуду  $MS = 4.6$ ,  $mb = 4.8$  (по данным ГС РАН). Оно сопровождалось обрушением панелей по залежи Златоуст-2-IV-V на площади 480 тыс.м<sup>2</sup> (900x680 м). Объем обрушившихся пород - 144 млн. м<sup>3</sup>, вес - 375 млн. т.

Через два года 23 июня 1996 г. обрушились выработанные пространства на шах. 42-47. На поверхности ушло в провал здание дробилки ОТК, в шахте погибло 6 человек. Данное обрушение сопровождалось сейсмическим событием с магнитудой  $mb = 3.7$  (по данным NEIC и ISC).

После указанного события началось создание системы сейсмического мониторинга Жезказганского месторождения, которая начала работать в 1997 году и позволила контролировать сейсмичность в местах ведения горных работ. Начиная с этого времени, частота и сила мощных техногенных землетрясений стала уменьшаться.

С 1997 г. произошло два сильных землетрясения. 10.09.2002 в районе шахты 57бис произошло обрушение на площади 116 480 тыс.м<sup>2</sup>. Оно сопровождалось сейсмическим событием с  $MS = 3.8$  (ISC),  $mb = 4.5$  (ГС РАН). 24.06.2005 на шах. 45 обрушились выработанные пространства штреков 1-8 по залежи ПЮЗ-9-1 на площади 152 тыс.м<sup>2</sup>. В шахте от воздушного удара погибло 3 человека. Сейсмические сети зарегистрировали его как землетрясение с  $MS = 3.5$  (ISC),  $mb = 4.2$  (ГС РАН).

Событие 2005 г. привело к реорганизации геомеханических служб, контролирующих состояние выработок месторождения. В 2007 г. на нем была установлена система сейсмического мониторинга компании ISS International (ныне Institute of Mine Seismology, Австралия). В это же время в практику прогноза обрушений на месторождении была внедрена методика, основанная на отслеживании параметра сближения сейсмических событий. Примеры прогноза обрушений по данной методике в реальном режиме времени приведены в статьях [2, 4, 7].

### **Физические принципы прогноза обрушений на примере Жезказганского медного месторождения**

В связи со скоротечностью обрушений на ЖМ особое значение приобретает анализ пространственного и энергетического/масштабного распределений зарегистрированных событий, а также их изменения со временем. Применение концентрационного критерия разрушения твердых тел [5, 6, 10] позволяет проводить такой анализ.

В настоящее время основным методом выделения опасных зон на основе данных сейсмического мониторинга на рудниках ЖМ является модифицированный

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

концентрационный критерий разрушения твердых тел [1 – 4]. При этом для оценки концентрации дефектов использовался не концентрационный параметр  $k$ , а параметр сближения сейсмических событий  $\kappa$ , который рассчитывается для каждой пары сейсмических событий с индексами  $i$  и  $j$  без применения процедуры осреднения, он характеризует возможность взаимодействия событий с индексами  $i$  и  $j$ :

$$\kappa_{ij} = \frac{d_{ij}}{(L_i + L_j)/2},$$

где  $d_{ij}$  – расстояние между гипоцентрами/эпицентрами событиями, а  $L_i$  и  $L_j$  – размеры соответствующих им дефектов.

Условие возникновения опасной ситуации  $\kappa_{ij} < \kappa_*$  можно записать в виде

$$\kappa_{ij} = \frac{d_{ij}}{(L_i + L_j)/2} < \kappa_* \text{ или } d_{ij} < (\kappa_* L_i + \kappa_* L_j)/2.$$

В рамках данного подхода взаимодействие двух дефектов возможно, если пересекаются области их влияния, имеющие радиус  $\kappa_* L/2$ . Чем крупнее дефект соответствующий событию, тем больше размер этой зоны. Цепочки из данных зон образуют опасные области, где можно ожидать возникновения обрушения (см. Рис. 1).

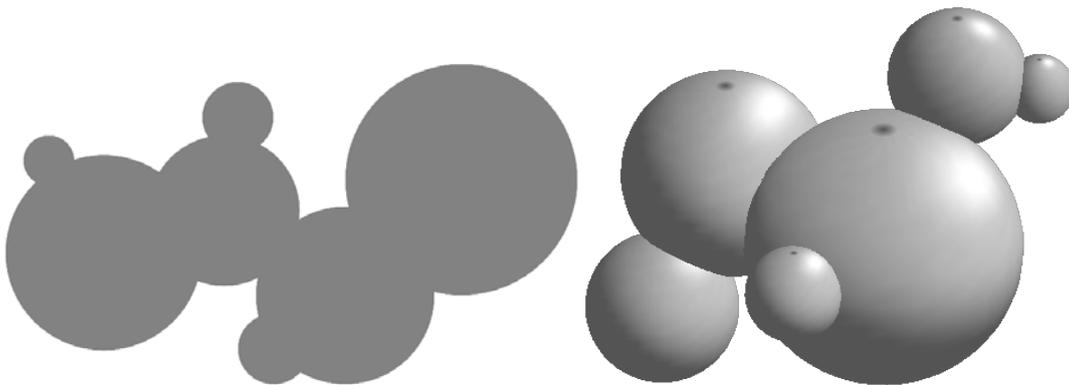


Рис. 1. Цепочки из зон влияния событий, образующие потенциально опасные области слева – на плоскости (если нет данных о глубине), справа – в пространстве

Данная модификация концентрационного критерия разрушения твердых тел хорошо согласуется с представлениями механики разрушения. Типичной формулой для напряжений вокруг трещины размером  $L$ , на расстоянии  $r$  является:

$$\sigma = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{\theta}(\theta)$$

[9, с. 79], где  $f_{\theta}(\theta)$  – функция распределения напряжений по угловой координате, а коэффициент интенсивности  $K$  обычно представляется в виде  $K = \sigma_e \sqrt{\pi LY}$ , где  $Y$  – «К-

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

тарировка»,  $\sigma_e$  – внешнее напряжение, действующее на трещину [9, с. 102; 11], тогда выражение для напряжений приобретает вид:

$$\sigma = \sqrt{\frac{L}{r}} \frac{\sigma_e Y f_\theta(\theta)}{\sqrt{2}},$$

откуда

$$r = \frac{(\sigma_e Y f_\theta(\theta))^2}{2\sigma^2} L = \kappa'(\sigma, \theta, \sigma_e) L / 2.$$

Таким образом, если в последнем выражении пренебречь зависимостью от угловой координаты (заменить  $f_\theta(\theta)$  на константу – ориентация дефектов в массиве горных пород, как правило, не известна), то получится, что радиус опасной зоны вокруг трещины – зоны повышенных напряжений задается таким же образом как радиус зоны влияния события в модифицированном концентрационном критерии, т.е. критическому значению концентрационного параметра можно поставить в соответствие критическое значение напряжения (критерии разрушения с критическими напряжениями также имеют широкое распространение в инженерной практике). Большие значения напряжений соответствуют малым значениям параметра сближения событий. Интересным результатом также является то, что в соответствии с выражением для  $\kappa'$  критическое значение параметра сближения событий / концентрационного параметра будет возрастать при увеличении действующих в массиве напряжений.

При оценке сейсмической опасности на ЖМ цепочки зон вокруг событий с радиусом  $\kappa_* L / 2$  рассматриваются как наиболее опасные. Для условий ЖМ было установлено, что области, выделенные для  $\kappa_* = 8$  относятся к потенциально опасным, а для  $\kappa_* = 5$  – к критическим (неустойчивым) или уже обрушенным. Таким образом, для массива ЖМ, представленного перемежающимися слоями серых песчаников и красноцветных пород (алевролитов, аргиллитов) значение параметра сближения, при котором происходят обрушения подработанной толщи пород с линейными размерами в десятки и сотни метров, равно  $\kappa_* \approx 5...8$ .

При необходимости разделения процессов разрушения на различных горизонтах применяется соответствующая фильтрация событий. Как правило, для анализа используются данные, зарегистрированные за последние два года. Еще одной особенностью оценки сейсмической опасности является то, что события, имеющие энерговыделение  $E > E_{\max}$ , при расчете их размера  $L$  рассматриваются как события с  $E = E_{\max}$ , это позволяет избежать излишнего увеличения зоны влияния такого сильного сейсмического события. Как правило,  $E_{\max} \approx 100E_{\min}...1000E_{\min}$  [3].

***ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ***

Для применения концентрационного критерия разрушения также важно то, что каждое сильное событие готовят события, энерговыделение которых до трех десятичных порядков меньше [3], т.е. для прогноза событий с энерговыделением  $E$  сейсмическая сеть должна уверенно регистрировать события с энерговыделением  $E/1000$ . Кроме того, анализ выражения для вычисления  $k$  показывает, что для его определения с ошибкой, не превышающей 50%, сейсмическая сеть должна позволять:

- находить координаты гипоцентров событий с ошибкой, не превышающей двух линейных размеров дефекта, соответствующего событию (порядка 10 метров для слабых событий),

- достаточно точно определять энерговыделение сейсмического события, используемое для расчета линейного размера дефекта, с ошибкой, не превышающей 300% (0.5 десятичного порядка по энерговыделению).

К сожалению, установленные системы мониторинга не всегда позволяют регистрировать события с необходимой точностью, что в ряде случаев может значительно снижать эффективность описанной процедуры прогноза. Решить эту проблему предполагается расширением установленной системы мониторинга, с увеличением плотности сети датчиков.

Первые попытки применения модифицированного концентрационного критерия для реального прогноза на ЖМ были предприняты в 2005 г. Несмотря на то, что на тот момент были доступны только данные о сейсмичности, полученные результаты были успешными – удалось спрогнозировать крупное обрушение [7]. С сентября 2007 г. на ЖМ данный критерий был внедрен в качестве основного. За это время были спрогнозированы все основные обрушения. Первый прогноз опасности возникновения делается, как правило, за месяц до реализации обрушения.

Дополнительными важными предвестниками готовящегося крупного обрушения являются «сейсмические бреши» первого и второго рода (области со слабой сейсмической активностью), а также миграция сейсмичности [8].

Дополнительное повышение эффективности прогноза достигается при сопоставлении данных сейсмического мониторинга и их анализа с актами о визуальных обследованиях подземных выработок, с их геомеханическими планами, результатами дополнительного геомеханического анализа (прежде всего с расчетами коэффициента запаса прочности целиков), а также с геодезическими измерениями оседаний вдоль профильных линий на дневной поверхности.

### **Заключение**

Рассмотренный опыт прогноза обрушений на Жезказганском медном месторождении показывает, что эффективным средством контроля за текущим состоянием выработок

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

является сейсмический мониторинг. Совместный анализ пространственно-временного и энергетического распределения регистрируемых сейсмических событий с применением современных физических представлений о процессе разрушения горных работ позволяет прогнозировать обрушения.

С сентября 2007 г. на Жезказганском месторождении в качестве основного критерия возникновения опасной ситуации был внедрен модифицированный концентрационный критерий разрушения твердых тел. Начиная с этого времени, были спрогнозированы все основные обрушения. Первый прогноз опасности возникновения делается, как правило, за месяц до реализации обрушения.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-05-00158 А и 14-45-04157 р\_сибирь\_а).*

### **Список литературы**

1. Герман В.И. Разработка формализованной методики выделения микросейсмических данных, соответствующих подготовке горных ударов. // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: Материалы I-й Международной школы-семинара (9–15 сентября 2001, г. Красноярск). – Красноярск: СибГАУ, 2002. – С. 98–104.
2. Герман В.И. Прогноз обрушений на рудниках по данным сейсмического мониторинга // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 2. – С. 99-109.
3. Герман В.И., Мансуров В.А. Мониторинг индуцированной сейсмичности и процедура выделения очагов горных ударов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2002. – № 4. – С. 28-37.
4. Герман В.И., Мансуров В.А. Прогноз обрушений на Жезказганском медном месторождении. // ГИАБ. – 2010. – № 1. – С. 95-104.
5. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А., Савельев В.Н., Султанов У.С. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел // Физические процессы в очагах землетрясений / Под ред. М.А. Садовского, В.И. Мячкина. – М.: Наука, 1980. – С. 78–86.
6. Маловичко А.А., Завьялов А.Д., Козырев А.А. В кн. Природные опасности России. Т.1. Сейсмические опасности. – М.: Крук, 2000. – С. 243–293.
7. Мансуров В.А., Герман В.И. Прогноз обрушений на жезказганском месторождении по данным сейсмического мониторинга // Горный журнал. – 2007. – № 1. – С. 89-92.
8. Могги К. Предсказание землетрясений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 382 с.
9. Партон В.З. Механика разрушения: от теории к практике. – М.: Наука. 1990. – 240 с.
10. Рассказов И.Ю. Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона. – М.: Горная книга, 2008. – 329 с.
11. Das S., Scholz C.H. Theory of Time-Dependent Rupture in the Earth. // J. Geophys. Res. – 1981. – V. 86. – P. 6039-6051.

УДК 550.34.01

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ В РАЗРЕЗЕ «НЕРЮНГРИНСКИЙ» НА ОХРАНЯЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ**

**Черных Е.Н.**

*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, e-mail: cher@crust.irk.ru*

Проведены измерения вибраций от поездной нагрузки и сейсмических колебаний от взрыва на участке железной дороги подвергавшегося воздействию 8-бального землетрясения и с наличием деформированных опор контактной сети. Оценен сейсмический эффект от проходящих поездов и определена критическая скорость при проведении взрывов вблизи железнодорожного полотна.

Ключевые слова: разрез «Нерюнгринский», поездная нагрузка, сейсмические колебания, взрывы.

Сейсмическое воздействие крупных промышленных взрывов является наиболее значимым геоэкологическим фактором особенно при открытом способе разработки полезных ископаемых, когда используются заряды ВВ большой массы (от 300 до 1400 тонн). Интерес к этой проблеме определяется, прежде всего, необходимостью обеспечения безопасности ведения горных работ в районе расположения особо охраняемых объектов ОАО ХК «Якутуголь», к которым относятся: Нерюнгринская обогатительная фабрика (НОФ), административно-бытовой комбинат (АБК), автобаза технологического автотранспорта (АТА).

При постоянно ужесточающихся требованиях к охране окружающей среды необходимо проводить детальный анализ геоэкологических эффектов массовых взрывов с целью совершенствования технологий и снижения негативного влияния горнодобывающего производства на среду обитания. Наибольший интерес представляет изучение сейсмического эффекта массовых взрывов, которое определяет целостность промышленных и жилых объектов. Так согласно СНИП II – 7-81 сооружения НОФ, АБК, АТА относятся ко II классу. Допустимые скорости колебаний грунта для сооружений анного класс, имеющие антисейсмические усиления, составляют  $\leq 5$  см/с. При многократном воздействии вследствие накопления деформаций, данная величина уменьшается.

Расчет сейсмической опасности для охраняемых объектов представляет собой по ряду причин относительно сложную инженерную задачу. Решение такой задачи невозможно без проведения комплекса экспериментальных измерений за сейсмическим эффектом от массовых взрывов.

Регистрация массовых взрывов, проводимых в «Нерюнгринском» карьере выполнялась 12-канальной цифровой инженерно-сейсмометрической станцией «Байкал-14» в

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

комплекте с сейсмоприемниками ОСП-2М (собственный период 0,167 с, затухание 10-15).  
Станция «Байкал-14» непосредственно регистрирует ускорения колебаний грунта в диапазоне частот 0.7 – 20 Гц и диапазоне амплитуд ускорений 0.01 см/с<sup>2</sup> - 30 см/с<sup>2</sup> (Рис. 1).

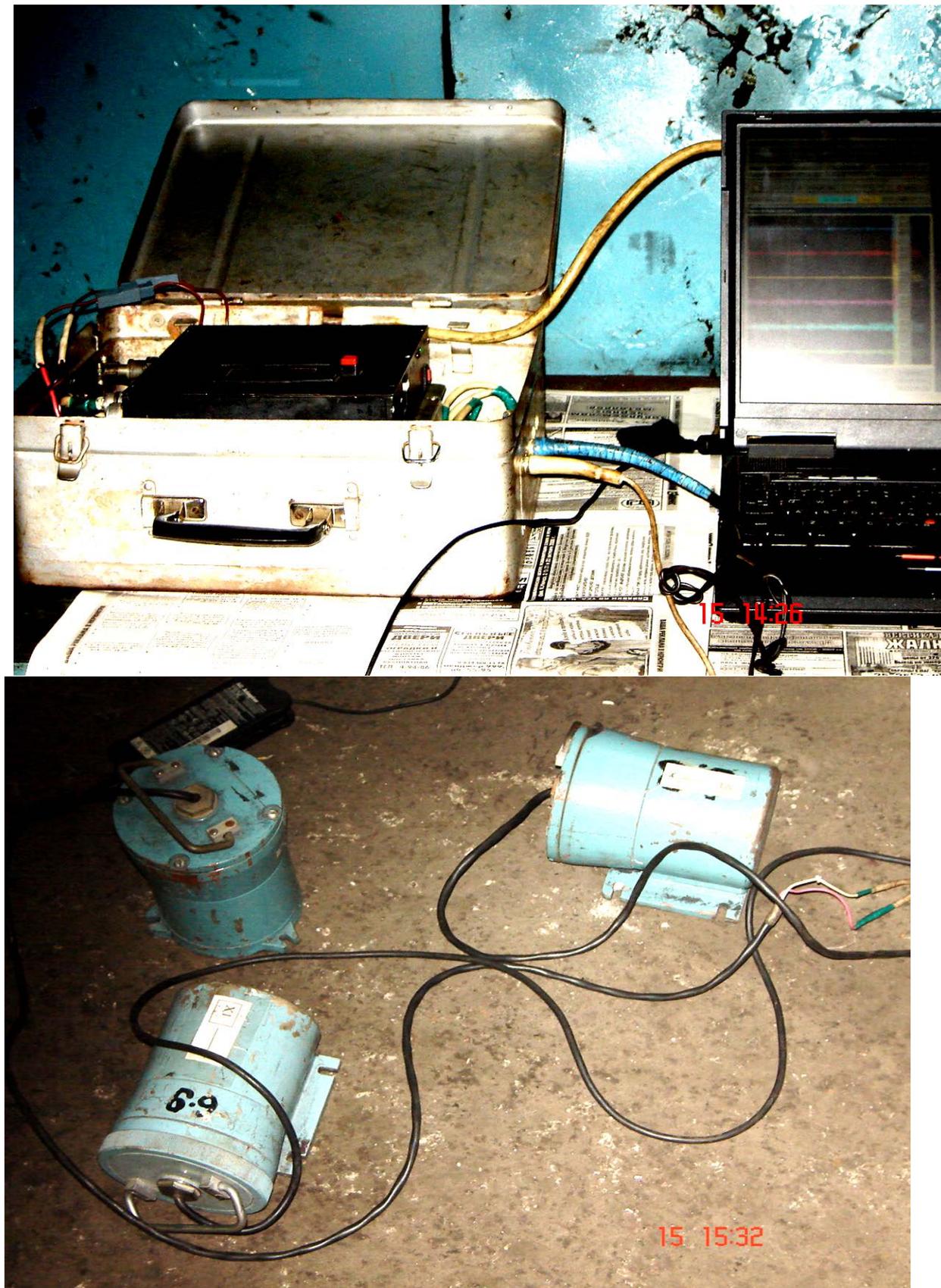


Рис. 1. Пример регистрации сейсмических колебаний грунта от взрыва

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

Так как при массовых взрывах производится одновременное инициирование нескольких блоков, в разной степени удаленных друг от друга в горизонтальной и/или вертикальной плоскости, сейсмоприемники ОСП-2М ориентировались не относительно взрыва, а относительно осей защищаемого сооружения по направлениям: X – поперечное направление. Y – продольное направление, Z – вертикальная ось.

При рассмотрении кинематических элементов сейсмических волн объективное определение сейсмического эффекта наиболее точно и полно дает векторное значение скорости перемещений (Богацкий, 1983, Цейтлин, Смолий, 1981, Садовский и др., 1987, Безопасность..., 2002). Наибольшая результирующая скорость определяется с учетом компонент X, Y, Z:

$$\bar{U} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}, \quad (1)$$

где –  $U_x, U_y, U_z$  - амплитуды скорости перемещений по компонентам X, Y, Z соответственно (Рис. 2).

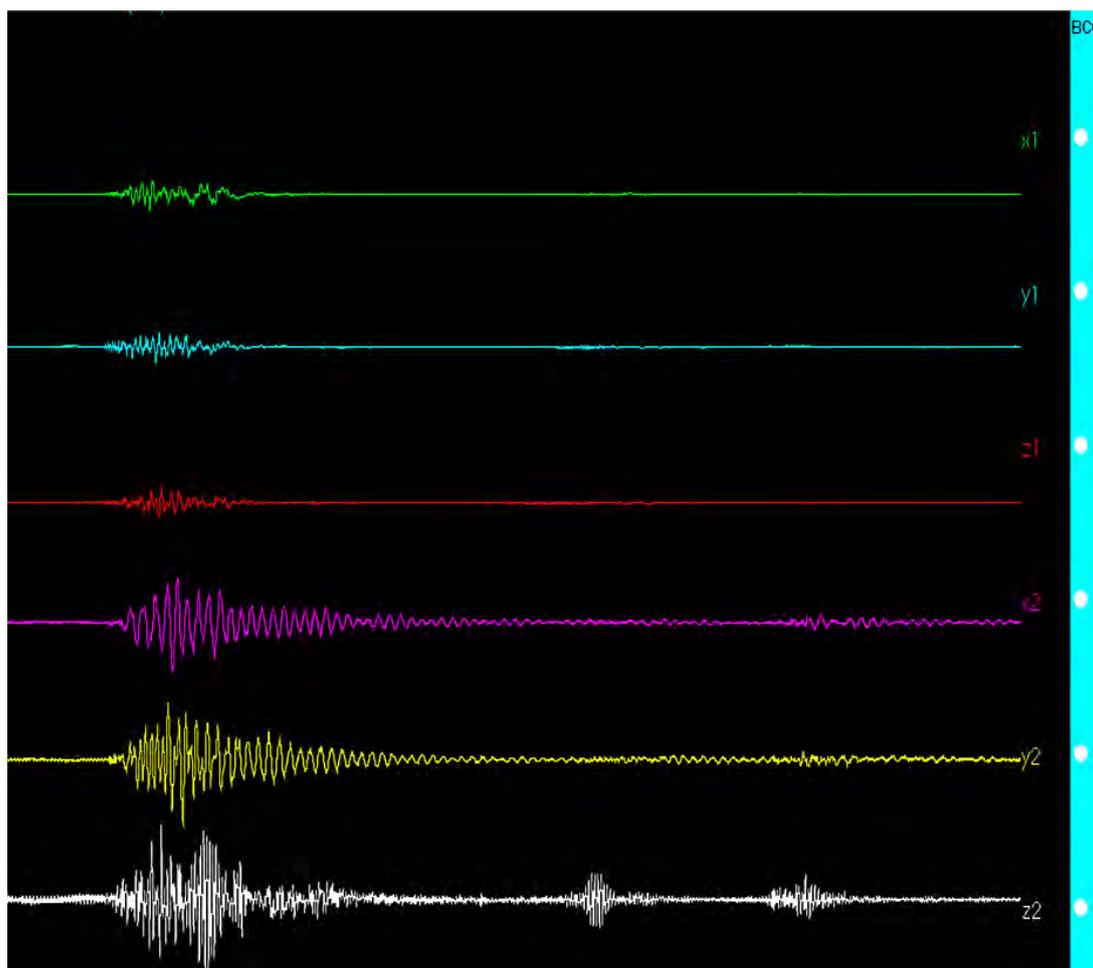


Рис. 2. Сейсмограмма скорости сейсмических колебаний 19.09.06 г. АБК

$X_1, Y_1, Z_1$  - амплитуд скорости смещений грунта в основании здания  
 $X_2, Y_2, Z_2$  - амплитуд скорости смещений здания на уровне 6 этажа

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

На практике максимальная результирующая скорость определяется по трем составляющим X, Y, Z максимумы которых, обычно, проявляются в различное время:

$$U_{xyz} = \left| \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \right| \max \quad (2)$$

Эта скорость, заменяющая  $\bar{U}$ , может быть равной или большей фактической векторной скорости, но разность обычно не превышает 20-30%.

В результате интерпретации зарегистрированных сейсмограмм, установлен диапазон изменения амплитуд скоростей смещений по компонентам в основании АБК составляет 0,004-0,05 см/с, в основании ОФ 0,01-0,158 см/с, АТА – 0,013 – 0,37см/с. При этом преобладают значения максимальных векторных амплитуд в диапазоне 0,04 - 0,06см/с (Рис. 3). По шкале балльности для взрывов (Богацкий, 1983) эти значения по уровню динамических нагрузок не превышают 1 балла.

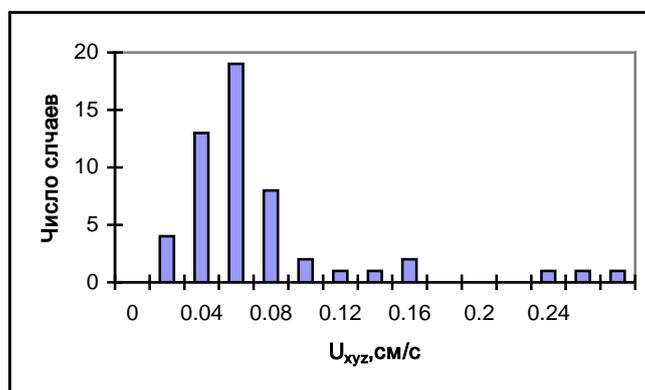


Рис. 3. Гистограмма распределения максимальных векторных амплитуд скоростей смещения грунта

Гистограмма распределения частот колебаний грунта при массовых взрывах, соответствующих максимальным амплитудам приведена на рисунке 4. Преобладающие частоты колебаний грунта при взрывах лежат в диапазоне 1,5 – 2,5 Гц.

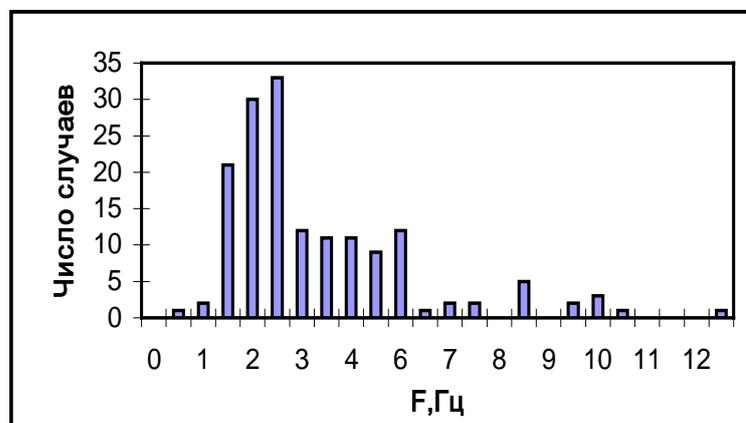


Рис. 4. Гистограмма распределения частоты колебаний грунта максимальных амплитуд скоростей смещения при взрывах

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

Зависимость максимальной векторной скорости от приведенного веса при взрывах, зарегистрированных в период с 7 июня по 16 декабря приведена на рисунке 5.

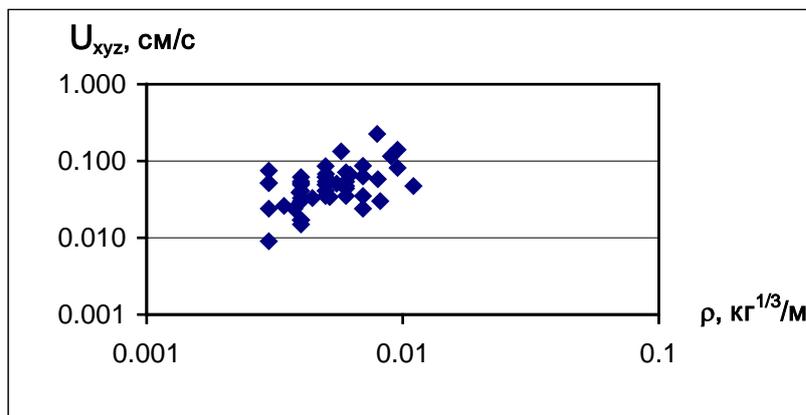


Рис. 5. Зависимость максимальной векторной скорости смещения грунта от приведенного веса заряда при взрывах в разрезе «Нерюнгринский»

При анализе сейсмического действия взрывов, следует учитывать особенности колебаний защищаемых сооружений. Как здание, находящееся под действием сейсмических колебаний, можно условно сравнить с фильтром, который усиливает колебания близкие по частоте к собственным частотам конструкции и подавляет другие. В таблице 1 приведены измеренные по записям сейсмических колебаний собственные частоты колебаний зданий АБК, ОФ и АТА.

Таблица 1

Собственные частоты колебаний сооружений АБК, ОФ и АТА

Объект	$f_x$ , Гц	$f_y$ , Гц
АБК	2.75	1.96
ОФ	2.51	1.65
АТА	1.19	1.18

Исходя из полученных характеристик, АБК и ОФ можно отнести к жестким зданиям по оси X, так как  $f_x > 2.5$  Гц, по оси Y АБК можно отнести к полужестким, а ОФ по оси Y – к гибким, здание АТА – к гибким ( $f < 1.67$  Гц) (Кузьменко и др, 1990). Учитывая спектральный состав колебаний, возбуждаемых взрывами, (Рис. 4) и значения собственных колебаний зданий АБК, ОФ и АТА следует признать это неблагоприятным фактором из-за возможности возникновения резонансных явлений.

В работе (Цейтлин, Смолий, 1981) рекомендуется при выборе допустимой скорости учитывать раскачку здания. Здесь под раскачкой понимается отношение максимального смещения измеренного на верху здания к максимальному смещению грунта. Аналогично понимается раскачка по скорости. Опыт показывает, что для жестких зданий обычного типа

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

величина раскачки составляет обычно 2-3 раза, а для гибких - 4-5 раз. Если прямые измерения показывают, что в данном конкретном случае раскачка превышает эти значения, то допустимую скорость рекомендуется уменьшать пропорционально раскачке (Цейтлин, 1981).

На рисунке 6 приведены значения отношений амплитуд колебаний верхнего этажа здания АБК, отношений амплитуд колебаний, зарегистрированных на отм. 42 ОФ, отношений амплитуд колебаний в п.н. 6 АТА к колебаниям грунта при взрывах.

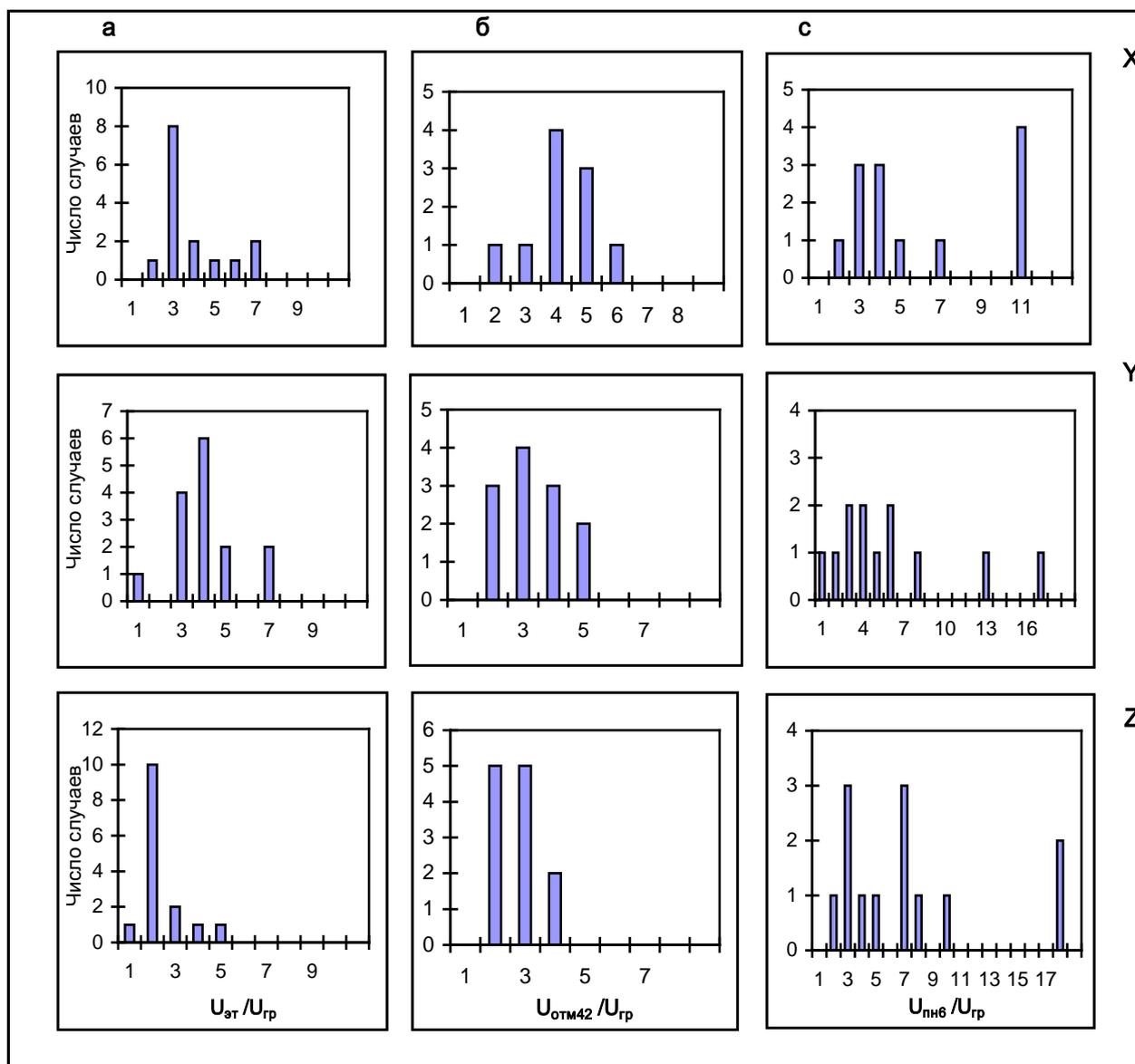


Рис. 6. Гистограммы значений отношения максимальных амплитуд колебаний верха к максимальным амплитудам колебаний грунта

а – здание АБК, б – здание ОФ, с – здание АТА

По компоненте X амплитуды колебаний верха АБК и отм.42 ОФ превышают амплитуды колебаний грунта для большинства взрывов в 3-4 раза. В двух случаях наблюдались значения отношений 7 раз. По компоненте Y, соответствующие значения отношений для здания АБК составляют 4 раза, для здания ОФ 3 раза. Здесь также

***ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ***

зафиксировано два случая, когда максимальная амплитуда колебания верха зданий АБК в 7 раз превышала максимальную амплитуду колебаний грунта. По вертикальным компонентам зданий преобладают отношения максимальных амплитуд 2-3 раза. Для АГА амплитуды колебаний верха могут превышать амплитуды колебаний грунта в 3 - 11 раз и более. Такие значения отношений амплитуд ( $11$  и  $>$ ), возможно, связаны с воздействием воздушной волны.

Большие значения отношений амплитуд колебаний здания к амплитудам колебаний грунта следует рассматривать как неблагоприятный фактор, связанный с возникновением резонансных явлений. В то же время опыт взрывных и вибрационных испытаний зданий на сейсмостойкость показывает, что большие значения отношений наблюдаются обычно при слабых динамических воздействиях. С ростом уровня динамических нагрузок (ускорений, скоростей, смещений), наблюдается уменьшение амплитуд колебаний здания относительно колебаний грунта (Черных, Павленов и др., 2000, Бержинский, Павленов и др., 2004). С учетом этого можно опираться на преобладающие значения отношений, как статистически обоснованные полученным экспериментальным материалом.

Таким образом, сейсмическая безопасность массовых взрывов является одним из наиболее важных аспектов разработки полезных ископаемых открытым способом. При постоянно увеличивающихся размерах добычной площади, приближения фронта горных работ к особо охраняемым объектам и повышении требований к устойчивости ранее возведенных зданий и сооружений, а также бортов разреза вопрос о сейсмическом воздействии стоит весьма остро. Это приводит к необходимости проведения мониторинговых исследований сейсмических волн от карьерных взрывов, а также уточнения зональности сейсмического воздействия при выборе параметров взрывной технологии для конкретных условий. Следует отметить, что детальное изучение характеристик сейсмических колебаний, порождаемых массовыми взрывами, позволит не только определить допустимые параметры взрывной технологии в конкретных случаях (масса одновременно взрываемых зарядов, расположение и объем взрываемых блоков, порядок подрыва скважин и т.п.), но также разработать рекомендации по ее совершенствованию и оптимизации.

### **Список литературы**

1. Безопасность при взрывных работах. Сборник документов. М. 2002. – 249 с.
2. Бержинский Ю.А., Павленов В.А., Бержинская Л.П., Ордынская А.П., Иванькина Л.И., Черных Е.Н., Масленникова Г.Н. Экспериментальные исследования сейсмостойкости безригельного каркаса серии 1.120С. //Проектирование и строительство в Сибири №5. Новосибирск, 2004 г. С. 19.
3. Богацкий В.Ф. Прогноз и ограничение сейсмической опасности промышленных взрывов. //Сейсмика промышленных взрывов. Москва. Недра, 1983. - С. 201-213.
4. Цейтлин Я.И., Смолий Н.И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. М., Недра, 181. 192 с.

***ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ***

5. Кутузов Б.Н., Совмен В.К., Эквист Б.В., Ватранов В.Г. Безопасность сейсмического и воздушного воздействия массовых взрывов: Учебное пособие для вузов. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. – 180 с.
6. СНиП II-7-81\*. Строительство в сейсмических районах / - М.: ГУП ЦПП, 2000. - 44 с.
7. Богацкий В.Ф. Прогноз и ограничение сейсмической опасности промышленных взрывов. //Сейсмика промышленных взрывов. Москва. Недра, 1983. - С. 201-213.
8. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. – М: Наука, 1987. – 100 с.
9. Безопасность при взрывных работах. Сборник документов. М. 2002. – 249 с.
10. Кузьменко А.А., Воробьев В.Д., Денисюк И.И., Дауетас А.А. Сейсмическое действие взрыва в горных породах. М.: Недра, 1990. 173 с.

УДК 550.371.2

## **НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ, ИНИЦИИРОВАННАЯ БУРОВЗРЫВНЫМИ РАБОТАМИ НА РАЗРЕЗЕ «НЕРЮНГРИНСКИЙ»**

**<sup>1</sup>Гриб Г.В., <sup>3</sup>Колодезников И.И., <sup>1,2</sup>Трофименко С.В., <sup>3</sup>Никитин В.М.**

<sup>1</sup>*Технический институт (филиал) ФГАОУ ВПО «Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Амосова» в г. Нерюнгри, 678960 Республика Саха (Якутия), г. Нерюнгри, ул. Кравченко, 16, e-mail: grib@nfygu.ru*

<sup>2</sup>*Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65, e-mail: urovsky@yandex.ru*

<sup>3</sup>*Академия наук Республики Саха (Якутия), Якутск, ул. Ленина, 33, e-mail: anrsya@mail.ru*

Рассмотрены вопросы изменения динамики сейсмического процесса при производстве массовых взрывов. Рассчитана статистика распределений землетрясений и взрывов в течение суток. Установлено снижение суммарной энергии землетрясений после начала техногенного воздействия на геологическую среду. В радиусе 60 км от карьера с момента начала работ на угольном разрезе не произошло ни одного землетрясения на уровне  $10^{12}$  Дж.

The questions of changing the dynamics of seismic process in the production of massive explosions. Statistics calculated the distribution of earthquakes and explosions throughout the day. The decline of the total energy of earthquakes since the beginning of anthropogenic impact on the geological environment. Within a radius of 60 kilometers from the quarry since the start of work at the coal mine there were no earthquakes at  $10^{12}$  J.

### **Введение**

Возрастающие масштабы и интенсификация освоения земных недр в современных условиях привели к появлению двух проблем, а именно: необходимости решения задач по прогнозированию чрезвычайных ситуаций, вызванных техногенной сейсмичностью и исследование возможности для активного вмешательства в динамику природной сейсмичности техногенными воздействиями.

При проходке горных выработок возникают очаги землетрясений, которые находятся на небольших расстояниях от выработки и поэтому интенсивно проявляются. При этом происходят не только микроземлетрясения, но и довольно сильные события (горные удары). Такие техногенные проявления неоднократно наблюдались в Карагандинском угольном бассейне [1], на апатитовых рудниках в Хибинах [2, 3]. Все горные удары происходили в непосредственной близости от разрывных тектонических нарушений. Причем, изменение напряженного состояния в массиве горных пород в результате инженерной деятельности приводило к образованию новых трещин и значительным подвижкам.

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

Сейсмические явления, возникающие вследствие техногенного воздействия на геологическую среду, принято называть наведенной сейсмичностью, которую подразделяют индуцированную и триггерную. Индуцированная сейсмичность проявляется в виде относительно слабых толчков при внешних возмущениях, эпицентры которых располагаются в пределах области воздействия техногенного источника. Триггерная сейсмичность возникает за счет высвобождения запасенной энергии тектонических деформаций геологической средой под воздействием внешних источников возмущений [4] и, следовательно, может проявляться на активизированных структурах в областях с высокой естественной природной сейсмичностью. Энергия образующихся при этом землетрясений может достигать естественного фона сейсмической активности.

Для условий Южной Якутии техногенные воздействия на геологическую среду обусловлены открытыми горными работами на разрезе «Нерюнгринский». В связи с высокой природной сейсмичностью и близостью промышленной зоны г. Нерюнгри к гражданским сооружениям, техногенные воздействия могут влиять на уровень сейсмических и экологических рисков [5]. Практическая значимость решения обозначенных задач для развивающегося Южно Якутского региона чрезвычайно высока. В этой связи, представляют несомненный интерес результаты анализа инструментальных наблюдений взрывов и землетрясений вблизи угольного разреза.

Практика геофизических исследований техногенной сейсмичности позволила сформулировать методические приемы анализа данного процесса. Во-первых, любую деятельность человека, связанную с воздействием на Земную среду следует рассматривать, как дополнительный энергетический фактор, который может изменять природный закон повторяемости землетрясений Гуттенберга – Рихтера  $\lg \bar{N}_i = \lg A - \gamma \Delta K_i$ , где  $\bar{N}_i$  - среднее число землетрясений, нормированных на единичный интервал времени и на некоторую площадь. Во-вторых, радиус учета влияния техногенного фактора должен определяться энергией взрывов.

Контролируемыми параметрами являются статистика взрывов, высвобождаемая энергия близких землетрясений и её изменение во времени, динамика повторяемости землетрясений по разным энергетическим классам. Конечная цель данных исследований – изучение сейсмических и экологических рисков для населения, работающего и проживающего в зонах повышенной сейсмической опасности.

### **Результаты наблюдений**

Нерюнгринский разрез (НУР) расположен севернее г. Нерюнгри, технологическая площадка которого пересекается двумя сопряженными активизированными Нижнее-Нерюнгринскими разломами: (Рис. 1). Современная активность данных тектонических структур подтверждена при производстве детальных геолого-геофизических исследований в

Южной Якутии [6], а также приуроченностью к ним серии мелких местных землетрясений 8 - 10-х классов ([ftp://ftp.gsras.ru/pub/Regional\\_Catalogs/каталог\\_ГС\\_РАН](ftp://ftp.gsras.ru/pub/Regional_Catalogs/каталог_ГС_РАН), Рис. 2).

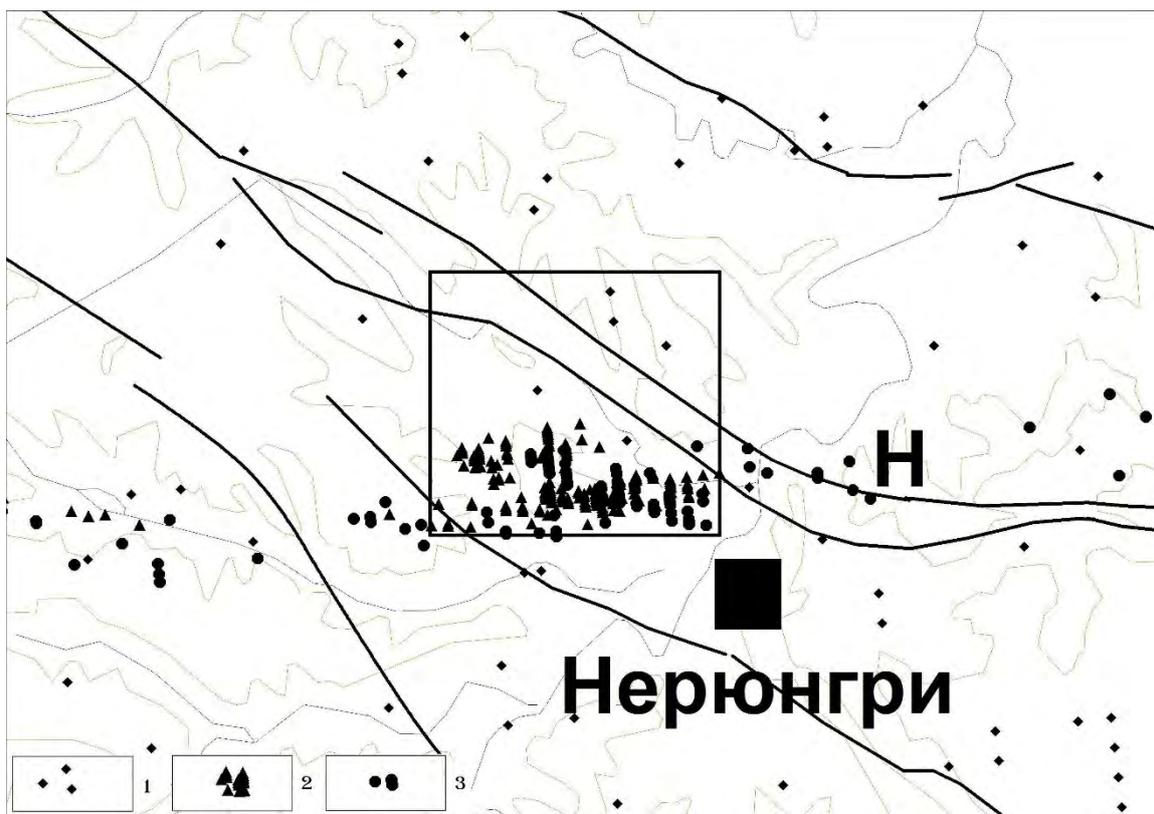


Рис. 1. Пространственное распределение пунктов взрывов и эпицентров слабых землетрясений ( $K < 7$ ) вблизи технологической площадки НУР

Условные обозначения: 1 – эпицентры землетрясений по каталогу ГС РАН; 2 – пункты взрывов; 3 – эпицентры землетрясений по данным Нерюнгринской сейсмологической станции.

Сейсмомониторинговые наблюдения в Южной Якутии проводятся с 2002 г. Одной из задач данных наблюдений является изучение влияния массовых взрывов при производстве горных работ на динамику природного сейсмического процесса. В результате качественного анализа установлено, что после большинства произведенных взрывов наблюдается повышение сейсмической активности в ближней зоне технологической площадки, причем низкоэнергетические землетрясения, следующие за произведенным взрывом в виде «афтершоков» происходят либо непосредственно вслед за взрывом, либо в течение суток после него [7].

Статистическими исследованиями показано, что первый максимум частоты распределения взрывов по часам в течение суток (Рис. 3, а (1)) находится в интервале от 3 до 4-х часов, второй – приходится на 7 часов (UT), что соответствует регламенту производства взрывов. Этим максимумам соответствуют два максимума количества

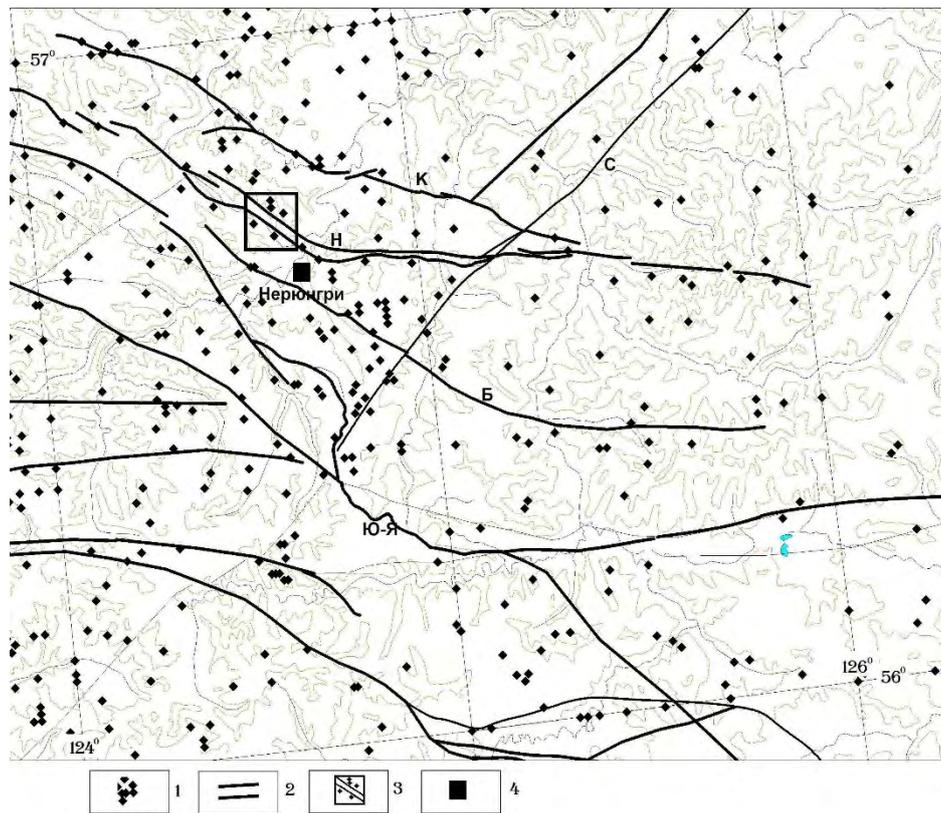


Рис. 2. Карта-схема распределения эпицентров землетрясений и активные разломы Южной Якутии [5]

Условные обозначения: 1 – эпицентры землетрясений; 2 – активные разломы: К-Кабактинский; Н - Нижне-Нерюнгринский; Б – Беркакитский; С – Суннагино - Ларбинский; Ю-Я-Южно – Якутский; 3 – технологическая площадка НУР; 4 – г. Нерюнгри

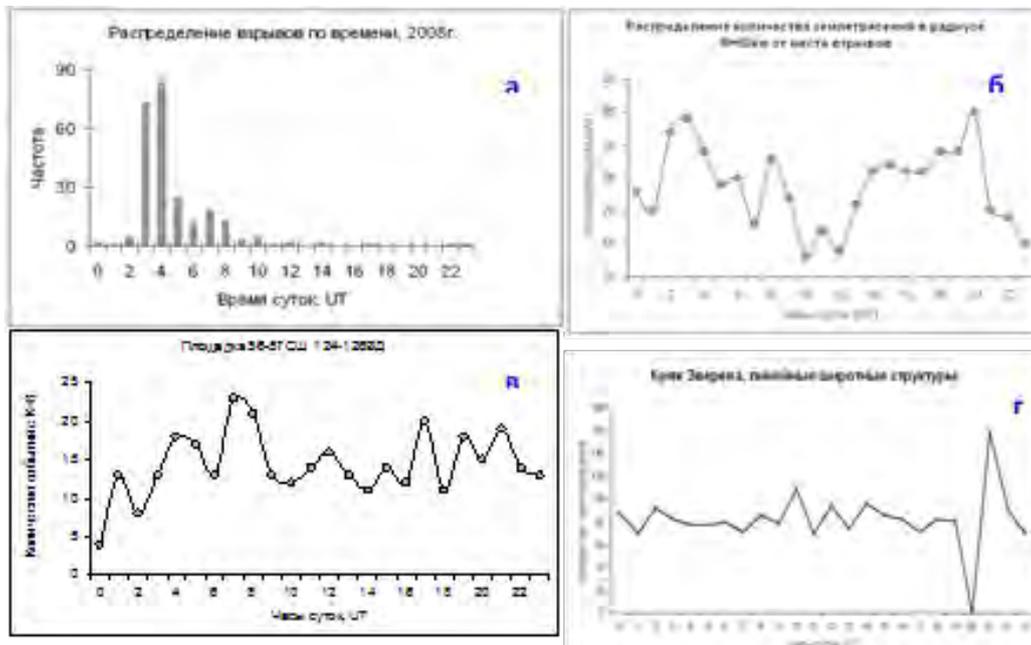


Рис. 3. Графики распределения по часам (UT) количества землетрясений и взрывов в течение суток

1 – статистика распределения взрывов; 2 – распределение землетрясений по часам по данным Нерюнгринской сейсмостанции в радиусе 60км от НУР; 3 – распределение землетрясений по часам по данным из каталога ГС РАН; 4 –распределение землетрясений по часам по данным из каталога ГС РАН кряжа Зверева.

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

низкоэнергетических землетрясений (Рис. 3, б(2)) по данным Нерюнгринской сейсмостанции (НСС). По каталогу ГС РАН с учетом землетрясений с энергией  $10^8$  Дж также выделяются максимумы в 4 и в 7 часов (Рис. 3, в(3)). Для западной части рассматриваемого участка, сейсмичность которого контролируется разломами субширотного простирания (Рис. 2), характерно равномерное распределение количества землетрясений.

Для оценки степени влияния технологических работ на природную сейсмичность в ближней зоне ( $1^0 \times 2^0$ ), т.е. примерно в радиусе 60 км от НУР, был произведен расчет высвобожденной энергии по годам (Рис. 4, а(1)). В целом данный график имеет вид линейной функции с постоянным углом наклона  $-2 \cdot 10^8$  Дж/год. График динамики объема взорванной массы (Рис.4, б(2)) имеет минимум 1998-1999 гг. и максимум в 2003-2004 гг. Землетрясение 25.05.2004 с энергией  $5 \cdot 10^{10}$  Дж произошло на фоне увеличения объёмов взрывных работ, а минимум сейсмической активности совпадает с минимумом количества среднегодового объёма взорванной массы.

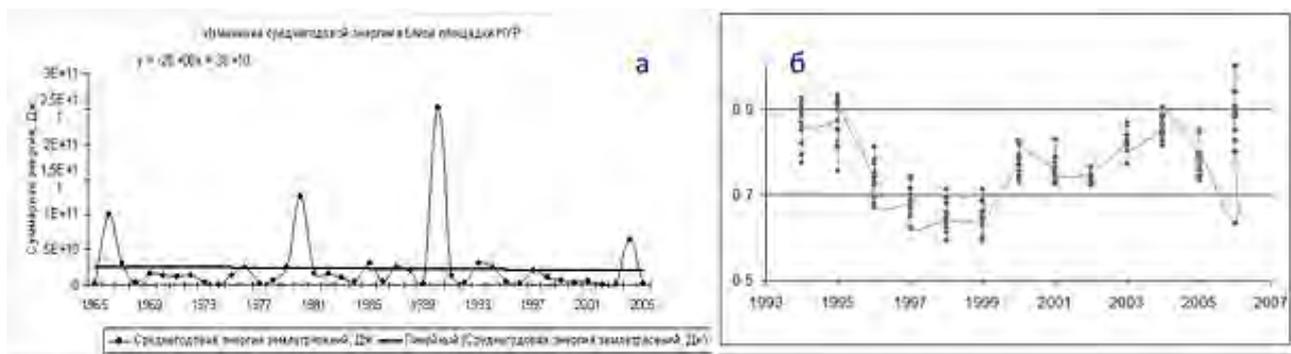


Рис. 4. Динамика высвобожденной энергии землетрясений в радиусе 60 км от НУР (а) и относительное количество взорванной массы (б)

Пространственное распределение взрывов и землетрясений показано на рисунке 1. Можно заметить, что положение эпицентров очагов землетрясений имеет выраженную тенденцию приуроченности к местам производства массовых взрывов [8]. Количественное сопоставление по результатам за 2004 г. показало, что из 80 зарегистрированных событий первая группа из 35 землетрясений (43%) произошли сразу, или спустя несколько часов после взрыва, оставшиеся события (57%) – в течение суток. Из 572 землетрясений, принятых к рассмотрению в радиусе 60км ( $t_s - t_p < 0.08c$ ,  $V_k = 8.4 \text{ км/с}$ ) по данным НСС 547 произошли в окрестности площадки НУР ( $t_s - t_p < 0.04c$ ).

**Анализ результатов наблюдений**

Рассмотрение статистики землетрясений по часам вблизи техногенного источника насыщения энергией геологической среды имеет важное значение в проблеме очищения

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

каталогов землетрясений от взрывов, а также в изучении взаимодействия природной и техногенной сейсмичности. Причем вариации сейсмичности, полученные авторами [8] для севера Амурской области и восточного участка трассы БАМ идентичны результатам настоящего исследования. Если предположить, что регламент взрывных работ обязывает проводить взрывы в период от 0 до 10 часов (UT), то первый максимум сейсмической суточной активности можно отнести к инициированной сейсмичности техногенного происхождения. Однако отсутствие максимума на широтных структурах (Рис. 3, г (4)) может означать, что техногенному воздействию подвержены активные структуры скрещающихся систем разломов.

Энергетический потенциал сейсмического процесса (диссипация энергии упругих деформаций) до и после производства массовых взрывов не изменился (см. Рис. 4, а(1)). Такой результат может свидетельствовать о том, что массовые взрывы от начала производства в 1982 г. до 2008 г. не оказывали существенного влияния на общий энергетический баланс сейсмостектонического процесса на энергетическом уровне  $10^8$ - $10^{10}$  Дж.

Ближайшее к разрезу землетрясение (56,83СШ, 124,42ВД) с энергией  $10^{11.4}$  Дж произошло 6 июля 1990г. на пике интенсивности взрывных работ в 20 км северо-западнее Нерюнгринского угольного разреза (НУР). Тем не менее, установить однозначно, что землетрясение с  $K=11.4$  является триггерным не представляется возможным т.к. высокоточные мониторинговые наблюдения в то время не проводились. Всего по каталогу ГС РФ на технологической площадке НУР отмечено 7 землетрясений с энергией выше  $10^{10}$  Дж. Одно землетрясение произошло до начала разработки карьера. Все события зарегистрированы вне временного максимума взрывов (Рис. 3) и, следовательно, вопрос о их принадлежности к триггерному эффекту явно, как и к составляющей природной сейсмичности остается открытым.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (гос. задание № 5.1771.2014К).*

### **Список литературы**

1. М.С. Хайдаров, В.В. Ильина Проблемы техногенной сейсмичности // Промышленность Казахстана. - №2, 2001.
2. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках. Под редакцией И.М. Петухова, А.М. Ильина, К.Н. Трубецкого. М.: Издательство АГН, 1997. -376с.
3. Козырев А.А., Панин В.И., Мальцев В.А. Изменение геодинамического режима и проявление техногенной сейсмичности при ведении крупномасштабных горных работ на апатитовых рудниках в Хибинском массиве. //Проблемы геодинамической безопасности:// Международное рабочее совещание. 24 - 27 июня 1997 - СПб: ВНИМИ, 1997 - с. 67 - 69.V.N.

**ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ.  
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

4. Николаев А. В. Проблемы наведенной сейсмичности //Наведенная сейсмичность. М.: Наука, 1994. С. 5-15.
5. Имаев В.С., Трофименко С.В., Гриб Н.Н., Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Мельников А.И., Никитин В.М., Статива А.С. Разломная тектоника и геодинамика в моделях очаговых зон сильных землетрясений Южной Якутии. – Томск: Изд-во Томского политех. института, 2007. - 273 с.
6. А.Н. Овсученко, С.В. Трофименко, Мараханов А.В., П.С., Карасев, Е.А. Рогожин, В.С. Имаев, В. М. Никитин, Н.Н. Гриб Детальные геолого-геофизические исследования зон активных разломов и сейсмическая опасность Южно-Якутского региона. - Тихоокеанская геология, 2009, том 28, №4, с. 55-74.
7. Гриб Н.Н., Трофименко С.В., Никитин В.М. Техногенные проявления сейсмичности в Южной Якутии в зоне открытых горных работ // Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы: Сборник материалов 4 Международного Симпозиума, 15-20 июня 2008 г.: Москва – Бишкек; 2009, С. 251-255.
8. Трофименко С.В., Гриб Н.Н. Использование промышленных взрывов для мониторинга локальных структур и решения прямых и обратных задач геофизики/ Четвертый всероссийский симпозиум «Сейсмоакустика переходных зон». - Владивосток. - Изд-во ДВГУ, 2005. -С.144-149.
9. Kevin G. Mackey, Kazuya Fujita, Larisa V. Goubina, Boris M. Kozmin, Valery S. Imaev, Ludmila P. Imaeva, Boris M. Sedov Explosion Contamination the Northeast Siberian Seismisiti Catalog: Implication for Natural Earthquake Distribution and Location of the Tanlu Fault in Russia //Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93, No. 2, pp. 737-746, April 2003
10. [ftp://ftp.gsras.ru/pub/Regional\\_Catalogs](ftp://ftp.gsras.ru/pub/Regional_Catalogs)

**УТОЧНЁННАЯ КАРТА СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ  
РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)**

**<sup>1</sup>Петров А.Ф., <sup>1,2</sup>Козьмин Б.М., <sup>1</sup>Шибает С.В., <sup>1</sup>Тимиршин К.В.**

*<sup>1</sup>Якутский Филиал Геофизической службы СО РАН, 677008 Республика Саха (Якутия),  
г. Якутск, пр. Ленина, 39, e-mail: petrov@emsd.ysn.ru*

*<sup>2</sup>Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980 Республика Саха  
(Якутия,) г. Якутск, пр. Ленина, 39, e-mail: b.m.kozmin@diamond.ysn.ru*

Приводятся сведения по исследованиям сейсмичности и сейсмического районирования территории Республики Саха (Якутия). Дается обзор карт общего сейсмического районирования, используемых в Российской Федерации. Дискутируется методология их построения. Для оперативного учёта изменений сеймотектонической обстановки в регионе предлагается использование уточнённой карты сейсмического районирования.

Ключевые слова: сейсмичность, сейсмическое районирование, сейсмическая шкала, актуализация карт районирования, вероятностные модели сейсмичности.

**IMPROVED SEISMIC ZONING MAP OF THE SAKHA REPUBLIC (YAKUTIA)  
TERRITORY**

**<sup>1</sup>Anatoliy F. Petrov, <sup>1,2</sup>Boris M. Kozmin, <sup>1</sup>Sergey V. Shibaev, <sup>1</sup>Konstantin B. Timirshin**

*<sup>1</sup>Yakutsk Branch of the Geophysical Survey, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk,  
39 Lenin pr., e-mail: petrov@emsd.ysn.ru*

*<sup>2</sup>Diamond and Precious Metal Geological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
Yakutsk, 39 Lenin pr., e-mail: b.m.kozmin@diamond.ysn.ru*

Results of studying the seismicity and seismic zoning of the Sakha Republic (Yakutia) territory are given. General seismic zoning maps used in the Russian Federation are reviewed, and methods of their construction are discussed. An improved seismic zoning map is offered taking into account the latest changes of the seismotectonic setting in the region.

Key words: seismicity, seismic zoning, intensity scale, upgrading of seismic zoning map, probability models of seismicity.

## ***СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ***

Сейсмические исследования на территории Республики Саха (Якутия) проводятся с 1956 года. В настоящее время в постоянном режиме работает 23 цифровые сейсмические станции Якутского филиала Геофизической службы СО РАН. Выявлены сейсмоопасные зоны различной интенсивности, общая площадь которых составляет более 2 миллионов квадратных километров. На северо-востоке Якутии определена граница Евразийской и Североамериканской литосферных плит, частью которой является сейсмическая зона хр. Черского в составе Арктико - Азиатского пояса, а на юге граница Евразийской и Амурской (Китайской) литосферных плит, частью которой является Олёкмо - Становая сейсмическая зона Байкало- Станового пояса. За эти годы сотрудниками Якутского института геологии и Якутского филиала геофизической службы СО РАН было составлено несколько карт сейсмического районирования территории Якутии, уточнение которых обусловлено получением новой сейсмотектонической информации. В 2014 году нами закончено составление очередного уточнённого варианта карты сейсмического районирования территории Якутии масштаба 1: 2.5 млн., выполненное по Госконтракту с Комитетом по инновационной политике и науке Республики Саха (Якутия). При проведении исследований использовались ранее составленные карты, новые сейсмотектонические материалы, последние сейсмические события и другие источники.

Первая карта сейсмического районирования Якутии масштаба 1:2.5 млн. [7] была составлена в 1975 году. Уточнённый вариант этой карты использовался при составлении карты Сейсмического районирования территории СССР. [8]. В 1996 году была составлена и издана Карта сейсмического районирования территории Республики Саха (Якутия) масштаба 1:2.5 млн. [2], которая в 1997 году Министерством строительства РС(Я) и Министерством регионального развития России была утверждена в качестве территориальных строительных норм (ТСН 22-301-97). Эти карты, научные материалы и данные сейсмических станций ЯФ ГС СО РАН были использованы при составлении Карт общего сейсмического районирования территории России – ОСР-97 и при их актуализации [10].

Изменение сейсмотектонических и геодинамических обстановок на Земле происходит постоянно, накапливаются новые сейсмические, инженерно- геологические и тектонические материалы, изменяются методы составления карт. Все эти и другие обстоятельства обуславливают необходимость периодического уточнения (актуализации) карт сейсмического районирования. В 1991–1997 гг., при работе над картой ОСР-97 была разработана [10] методология конструирования модели зон возникновения очагов землетрясений (ЛДФ-модель зон ВОЗ) и её сейсмогеодинамических параметризации: вместо традиционно одной детерминистской карты стал использоваться комплект вероятностных карт – ОСР-97, положивших начало динамическому сейсмическому районированию.

## **СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ**

Некоторые исследователи считают, что в настоящее время районирование сейсмической опасности может быть осуществлено лишь на вероятностной основе. Иными словами, риск всегда будет иметь место. По мнению [10], это и заложено в картах ОСР-97, позволяющих оценивать степень сейсмической опасности для объектов разных сроков службы и категорий ответственности на нескольких уровнях, отражающих расчетную интенсивность сейсмических сотрясений в баллах шкалы MSK-64, ожидаемых на конкретной площадке с заданной вероятностью в течение определенного интервала времени.

В 2009–2012 гг. выполнена актуализация карт ОСР-97. Был создан расширенный комплект карт ОСР-97\*, и ОСР-2012, возросло количество расчетных периодов повторяемости и введения дробных баллов с шагом 0,5 и 0,1 балла, а также карт, представленных в пиковых ускорениях колебаний грунта, в соответствии с двумя макросейсмическими шкалами – MSK-64 и проектом новой шкалы ШИЗ-2010 [10] на основе несколько актуализированной модели зон ВОЗ, что и комплект карт ОСР-97.

Предложенные изменения в принципы построение карт ОСР-2012 [10] до настоящего времени проходят апробацию и обсуждение в научных и производственных организациях России, занимающихся вопросами сейсмического районирования, проектирования и строительства, высказываются предложения по пересмотру методики их составления, даётся отрицательная (и положительная) оценка актуализированных СНиП «Строительство в сейсмических районах» и самих карт Общего сейсмического районирования ОСР-2012.

В работах Я. М. Айзенберга за 2012 - 2014 гг. утверждается, что актуализированные нормы (СП 14. 13330.2014) и старые карты ОСР-97 несовместимы и используемую сейсмическую шкалу, и систему баллов типа MSK-64 применять в актуализированных нормах нецелесообразно. Основными недостатками методологии общего сейсмического районирования [1], является использование в строительных нормах и картах баллов. «Баллы содержат некое количество разнородных факторов, которое наряду с величинами ускорений (неизвестно как именно определённые количественно), ... уровень разрушений, а не количественные сейсмологические данные, например, ускорения, скорости, смещения или другие параметры сейсмических воздействий». И далее: «Проектирование инновационных систем, высотных зданий с новыми системами сейсмозащиты требуют более полной и точной информации о параметрах сейсмических воздействий, таких как величины ускорений, скоростей, смещений грунта оснований, спектрального состава сейсмических колебаний и другой количественных сведений...»

О.В. Павленко [5] указывает на спорные вопросы и противоречия в предложенной [9] концепции: «Новые карты –это практически простое расширение набора карт ОСР-97. С момента создания карт ОСР-97 прошло 15 лет, пополнилась мировая база данных по сильным

## **СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ**

движениям, получены важные научные результаты и инженерная сейсмология шагнула вперёд, но эти материалы и достижения не использованы в новых картах сейсмического районирования». По мнению [5], переносить данные о сейсмических свойствах пород, выявленных в Калифорнии (США), на Кавказе или в зоне субдукции в районе Петропавловска-Камчатского на другие территории, как это сделано при актуализации карт ОСР-97, представляется недостаточно обоснованным. В актуализированных картах ОСР-97 нет инженерных данных, позволяющих строить большой набор карт с заявленной высокой детальностью, тем более в единицах пиковых ускорений. Карты, построенные в баллах сейсмической интенсивности, основаны на макросейсмических наблюдениях последствий землетрясений, проверялись полевыми наблюдениями и ощущениями жителей из зон сотрясаемости, а пиковые наблюдения не подтверждаются ни конкретными наблюдениями, ни расчётами. Некорректное, по мнению [5], использование соотношения связи сейсмической интенсивности с пиковым ускорением. В базах данных по сильным движениям имеются примеры записей с различием пиковых ускорений в 10–15 раз при фиксированной магнитуде и эпицентральной расстоянии. «Балльность вполне приемлема как средство общего сейсмического районирования. Использование балла не хуже, чем использование максимального ускорения и может иметь определённые преимущества» [5]. Карты общего сейсмического районирования, по мнению [5], целесообразно составлять, главным образом, на основании полученных материалов по количеству, месту и силе землетрясений, глубине гипоцентров, кинематике движений плит, данным по неотектонике, разрывным нарушениям (разломам), характеристикам зон ВОЗ, анализу геофизических полей – магнитных и силы тяжести, сейсмическим свойствам грунтов.

В работе [9] приводятся факты, показывающие некорректность применения пиковых ускорений для целей создания карт сейсмического районирования, т.к. попытки приписать какому-то баллу некоторые пиковые ускорения не увенчались успехом. Так, при сильнейшем землетрясении в Мехико пиковые ускорения составили всего  $1,8 \text{ м/с}^2$ , а при слабых землетрясениях они достигали  $5\text{--}6 \text{ м/с}^2$ . Показано, что пиковые ускорения зависят от преобладающего периода сейсмических волн и их продолжительности. Анализируя содержание СП 14.13330.2011 и карт ОСР-2012 авторы приходят к выводу: «... эту работу нельзя признать завершённой. Её законодательное утверждение в качестве обязательного нормативного документа может принести больше вреда, чем пользы...» [9]. Построенные вероятностные модели сейсмичности при определении параметров движения грунта в любом месте обладают большой неопределённостью конечных результатов, обусловленных неопределённостью исходных данных и самих моделей расчетов. Отрицательное отношение к актуализированным картам ОСР-2012 отражено и в [6].

## **СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ**

Для составления уточнённой карты сейсмического районирования Республики Саха (Якутия) сейсмоопасная территория была условно разделена на несколько зон: северо-восток, юг и центр. При оценке уровня сейсмической опасности использовался стандартный набор по сейсмичности прошлых лет и новейшие данные. Составлялись карты изосейст для отдельных сильных землетрясений и сводные карты сейсмических воздействий, учитывались карты сейсмической активности. Для районов с низкой активностью использовались карты плотности эпицентров землетрясений. По данным карт изосейст для разных участков территории уточнялись зависимость затухания интенсивности сейсмических колебаний с расстоянием и модели изосейст, оценивалась средняя частота и вероятность сильных подземных толчков, анализировались геолого-геофизические сведения по активным разломам, палеосейсмологии, дешифрированию космических снимков, данных космической и наземной геодезии, зон ВОЗ. Для оценки тектонического режима разных участков территории использовались также данные сопоставлений параметров фокальных механизмов сильных землетрясений с морфо-кинематической характеристикой крупных сейсмогенных разломов. В конкретных случаях определялись формы очаговых спектров для отдельных сильных подземных толчков, модели затухания, параметры усиления сейсмических волн в верхних слоях земной коры, параметры ослабления волн на высоких частотах и т.п.

Конфигурация зон балльности предлагаемой карты по сравнению с картой Общего сейсмического районирования-ОСР-97 «С» изменена в основном на Северо-Востоке и в Центре Якутии. На Северо - Востоке, в сейсмической зоне хр. Черского, в 2008-2013 гг. произошло 4 крупных события с силой 7-10 баллов в эпицентре, в том числе Абыйское 9-10-балльное землетрясение и многочисленные афтершоки. Его воздействия (от 3 до 7 баллов) ощущались в 7 арктических районах РС(Я) на площади более 500 тыс. кв. км. Значительно уточнена сейсмическая активность территории Центральной Якутии в междуречье Лена и Вилюй (Рис. 1). Здесь выявлена серия разломов четвертичного возраста, ограничивающих малоамплитудные грабены и горсты, произошли довольно многочисленные сейсмические события слабой и умеренной интенсивности до 6 баллов. Общее направление разломов в основном совпадает с таковыми верхнепалеозойско- мезозойского возраста и палеоавлакогенами (рифтами) [4]. В последнее время на этой территории обнаружено несколько вулканов верхнемезозойского? возраста [3].

На юге Якутии, в пределах Олёкмо-Становой зоны наибольшая сейсмическая активность наблюдалась в последние годы в районе Олёкмо-Чарского нагорья, Станового хр. и Алданского нагорья. Самые сильные Чаруодинские толчки 2005 г. не превышали 8 баллов.

Эти примеры показывают, что создаваемые карты общего сейсмического районирования являются дежурными, неспособными раз и навсегда установить уровень

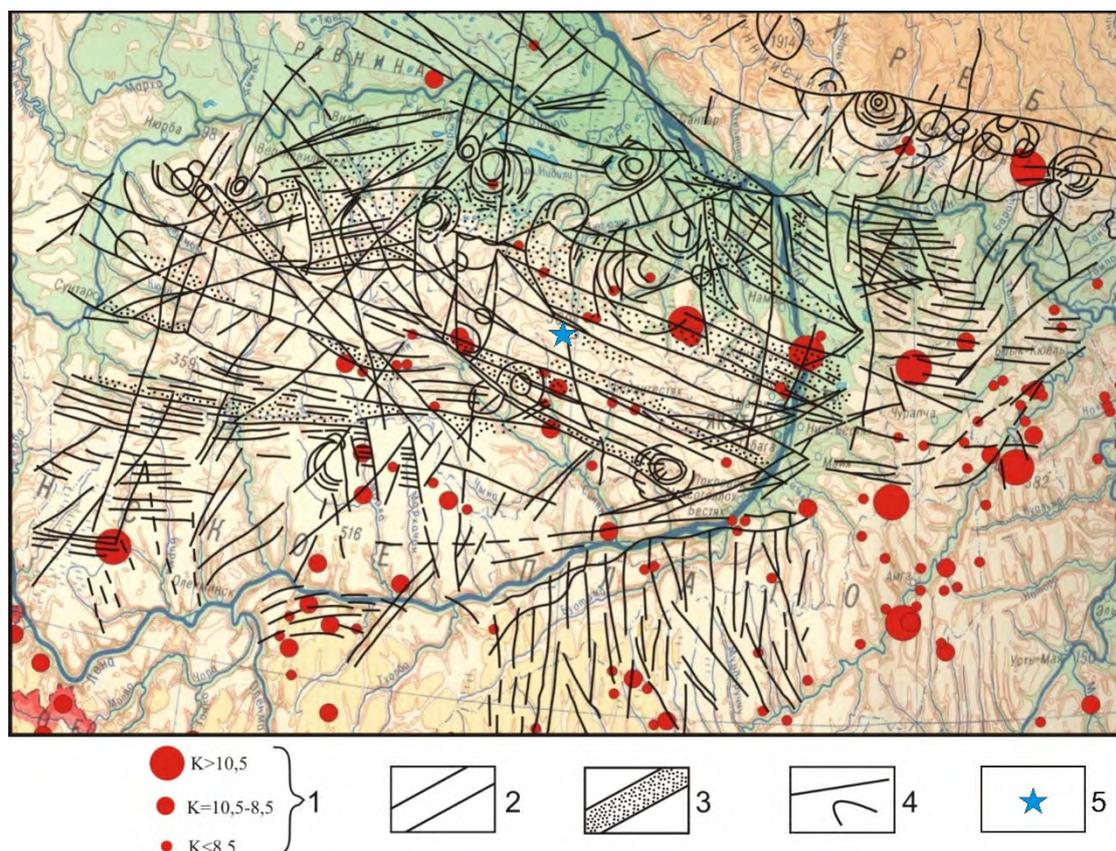


Рис. 1. Сейсмотектоническая карта Центральной части Якутии

1 – эпицентры землетрясений; 2 – приподнятые блоки-горсты; 3 – опущенные блоки-грабены; 4 – отдешифрованные элементы – уступы, разломы, ограничивающие грабены и горсты ранне- и поздне-четвертичного возраста. Кольцевые структуры – предположительно палеосейсмодислокации; вулкан верхнемезозойского возраста «Тень-01».

сейсмической опасности различных участков территории Российской Федерации, поэтому через 15–20 лет требуется пересматривать и уточнять их, независимо от способов составления, с использованием понятия «балл» или без него.

Оценивая созданные до настоящего времени карты общего сейсмического районирования территории Якутии с применением понятия «балл» можно констатировать, что в целом они отражают реальную картину сейсмической опасности. Имеющиеся между ними различия оценки сейсмичности отдельных районов территории Якутии по сравнению с предыдущими данными, связаны с недостаточной геолого-геофизической изученностью региона, а также редкой сетью сейсмических станций.

С учётом приведённой информации считаем, что применение балла при сейсмическом районировании территории Якутии на данном этапе правомерно, т.к. при разработке новых методов построения таких карт, их составления и утверждения пройдёт не менее 15–20 лет.

Поэтому, уточнённая Карта сейсмического районирования территории Якутии (Рис. 2), учитывающая данные неотектоники и современной сейсмотектонической обстановки, может

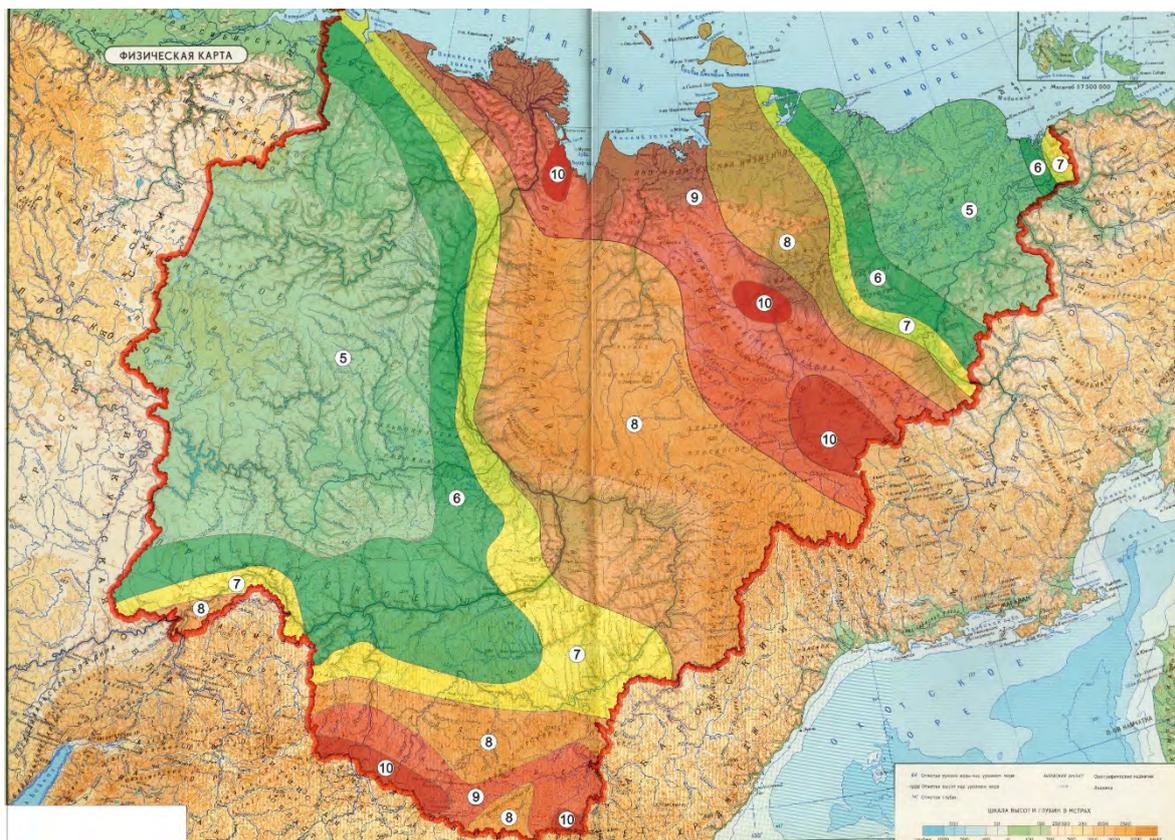


Рис. 2. Уточнённая карта сейсмического районирования территории Якутии  
масштаба 1:2 500 00.

быть использована при разработке актуализированных карт сейсмического районирования территории Российской Федерации и строительстве в сейсмоопасных районах Якутии

### **Список литературы**

1. Айзенберг Я. М. Нормы проектирования «Строительство в сейсмических районах СНиП П-7-81\*» актуализированы; на очереди актуализация карт сейсмического районирования //Тезисы докладов X национальной конференции по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием) 9-13 сентября 2013 года. – М.: 2013. С.7-8.
2. Карта сейсмического районирования территории Республики Саха (Якутия) М-б: 1:2 500 000. / Отв. редакторы: В. С. Имаев, Б. М. Козьмин, А. Ф. Петров. – Якутск: Якут АГП, 1996.
3. Костин А. В., Гриненко В. С., Олейников О. Б., Желонкина М. С., Кривошапкин И. И., Васильева А. Е. Первые данные о проявлении верхнемелового вулканизма зоны перехода «Сибирская платформа– Верхояно-Колымская складчатая область» // Наука и образование №1, 2015. С.30-36.
4. Мокшанцев К.Б., Гусев Г.С., Петров А.Ф. и др. Разломная тектоника территории Якутской АССР. – Якутск: Изд-во ЯФСО РАН СССР, 1976. 174 с.
5. Павленко О. В. Об актуализированных картах общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97 и картах ОСР-2012 (в порядке обсуждения) //Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2012, №5. С.16-23.

## **СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ**

6. Решение X юбилейной российской конференции по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием) (09-13 сентября 2013года, г. Сочи). // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. С.56-64.

7. Сейсмическое районирование Якутии и сопредельных территорий. Б.М. Козьмин, Г. С. Гусев, А. Ф. Петров и др. Отв. редактор К. Б. Мокшанцев. – Якутск: Якут. книжное изд-во,1975. 90 с.

8. Сейсмическое районирование территории СССР. Методические основы и региональное описание карты 1978г. Отв. редакторы В. И. Бунэ и Г. П. Горшков. М.: Наука, 1980. 306 с.

9. Уздин А. М., Белаш Т. А. Некоторые проблемы использования актуализированной версии СНиП «Строительство в сейсмических районах» // Природные и технические риски. Безопасность сооружений. 2013, №6. С.28-30.

10. Уломов В.И. Актуализация нормативного сейсмического районирования в составе Единой информационной системы «Сейсmobезопасность России» // Вопросы инженерной сейсмологии. 2012. Т. 39, № 1. С. 5 – 38.

**ДОБРОТНОСТЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БАЙКАЛЬСКОЙ  
РИФТОВОЙ ЗОНЫ ПО ДАННЫМ СТАНЦИЙ «ХУРАМША» И «ФОФОНОВО»**

<sup>1</sup>Герман Е.И., <sup>1</sup>Тубанов Ц.А., <sup>1</sup>Предеин П.А.

<sup>1</sup>*Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, e-mail: net-admin@list.ru*

Для определения добротности земной коры предложена методика расчета затухания по прямым S-волнам, основанная на сравнении величин амплитуд сигнала одного события зарегистрированного двумя сейсмостанциями, расположенными на пути движения волны. Приведены результаты апробации данной методики по записям со станций «Хурамша» и «Фофоново» локальной сети БурФ ГС СО РАН.

Ключевые слова: добротность, затухание сейсмических волн, распространение сейсмических волн.

**CRUST Q-FACTOR OF THE CENTRAL PART OF THE BAIKAL RIFT ZONE  
ACCORDING DATA FROM STATIONS «HURAMSHA» AND «FOFONOVO»**

<sup>1</sup>German E.I., <sup>1</sup>Tubanov TS.A., <sup>1</sup>Predein P.A.

<sup>1</sup>*Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, 6a Sakhyanovoy Str., e-mail: net-admin@list.ru*

To determine Q-factor of the crust proposed calculating the attenuation of the direct S-wave method which based on a comparison of the amplitudes of the signal events which recorded two seismic stations located in the path of the wave. The results of testing this method on records from the stations «Huramsha» and «Fofonovo» BurF GS SB RAS are presented.

Keywords: Q-factor, attenuation of seismic waves, seismic wave propagation

**Введение**

Сейсмическая добротность является важной упругой характеристикой земной коры, описывающей затухание сейсмической энергии при прохождении волн в геологической среде. Мониторинг этого параметра позволяет обнаружить структурные изменения в земной коре, а корректное определение сейсмической добротности, имеет большое значение в задачах оценки сейсмического воздействия при моделировании синтетических сейсмограмм.

Большинство методов расчета добротности дают довольно грубые и усредненные характеристики земной коры. Использование неточных значений добротности при моделировании синтетических сейсмограмм может привести к некорректным оценкам сейсмического воздействия.

### **Цель работы**

Целью данной работы является сравнительный анализ результатов использования наиболее распространенных методик оценки добротности земной коры центральной части Байкальской рифтовой зоны и апробация предложенного нами метода, основанного на сравнении величин амплитуд сигнала одного события зарегистрированного двумя сейсмостанциями, расположенными на пути движения волны.

### **Материал и методы исследования**

Согласно модели, предложенной Battaglia и Aki [4], интенсивность сейсмической волны, распространяющейся в геологической среде, уменьшается с расстоянием по закону

$$I(r) = I_0 \frac{1}{r} e^{-\frac{\pi fr}{Qc_s}}, \quad (1)$$

где  $I_0$  – интенсивность волны в очаге,  $c_s$  – скорость поперечной волны,  $Q$  – добротность среды, в которой распространяется волна, множитель  $\frac{1}{r}$  учитывает расхождение объемной волны.

Данная эмпирическая закономерность находит большое распространение в задачах локации сейсмических событий и моделирования сейсмических процессов [7, 5, 3], однако большую погрешность в таких расчетах вносят невозможность определения интенсивности волны в очаге и неточность в задании значения добротности.

Сейсмическая добротность  $Q$  – величина безразмерная, обратная затуханию. Добротность определяет отношение всей принятой и проведенной средой энергии к энергии, поглощенной и рассеянной этой средой за один период волны.

Существует довольно много методик определения добротности земной коры, наиболее распространенные из них основаны на расчете затухания кода-волн [6, 1].

Кода-волны – это пакет неоднократно отраженных волн, который вступает через несколько секунд после прямых Р- и S-волн. Согласно Aki [3] закономерность затухания таких волн не зависит от расстояния и пути от источника до приемника. Основываясь на этой теории, в работе [2] были рассчитаны значения добротности по методу, описанному в [6] с использованием данных локальной сети Бурятского филиала ГС СО РАН, однако, ряд полученных результатов имеет большую дисперсию, а значения добротности, полученной при нормировке кода волн на Р-волну и S-волну имеют существенные отличия, что свидетельствует о высокой погрешности расчета  $Q$  по данному методу. Так же, нами был произведен расчет добротности земной коры по методу, описанному в [1], результаты, рассчитанные по записям 60-ти событий дали относительную погрешность в 28%.

Основываясь на модели Aki [4] в данной работе предложена другая методика определения добротности.

## СЕЙМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ

Обозначив за  $I_1$  и  $I_2$  интенсивности прямой поперечной волны, зарегистрированные на приемниках 1 и 2, которые находятся на одном профиле от источника  $O$  на расстояниях  $r_1$  и  $r_2$  соответственно (Рис. 1), можно записать выражение (1) в виде:

$$I_1 = I_0 \frac{1}{r_1} e^{-\frac{\pi f r_1}{Q c_s}}$$
$$I_2 = I_0 \frac{1}{r_2} e^{-\frac{\pi f r_2}{Q c_s}}. \quad (2)$$

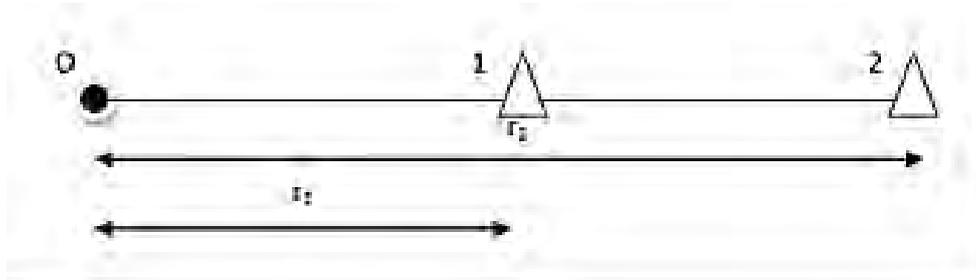


Рис. 1. Схема расположения источника и приемников

Выполнив преобразования, получаем выражение для добротности в среде между приемниками:

$$Q = \frac{\pi f}{c_s} \left( \ln \frac{I_1 r_1}{I_2 r_2} \right)^{-1} (r_2 - r_1). \quad (3)$$

Для апробации методики нами сделана выборка из записей 25 событий, зарегистрированных станциями «Хурамша» (hrm) и «Фофоново» (ffn) (Рис. 2).

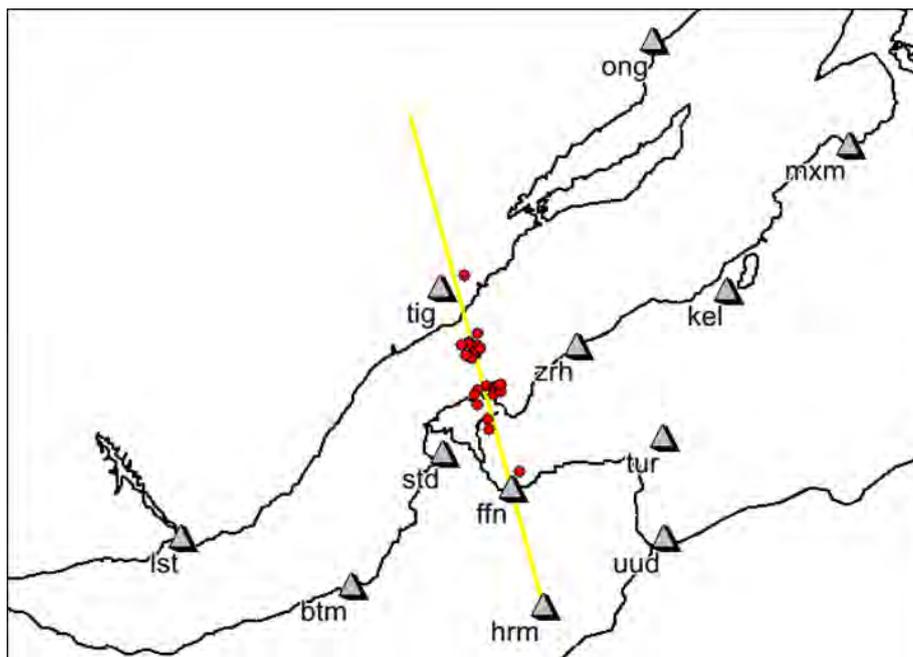


Рис. 2. Схема расположения станций локальной сети и очагов землетрясений

## СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ

Сейсмограммы событий с каждой станции отфильтрованы полосовым фильтром Баттерворта в октавных диапазонах в ряде частот от 1 до 20 Гц с шагом в 1 Гц.

Так как S-волна представляет из себя запись пакета прямых, отраженных и преломленных волн, для определения ее интенсивности будем использовать квадрат первого максимума модуля вступившей волны (Рис. 3).

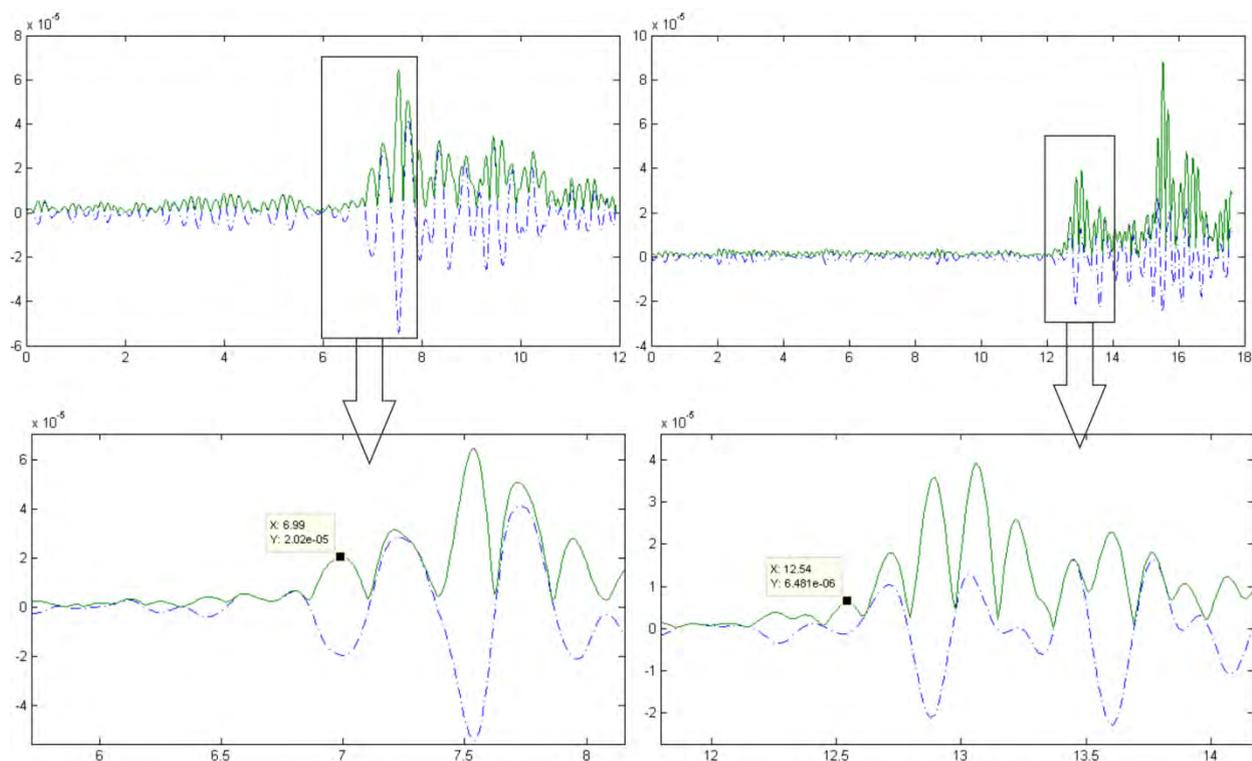


Рис. 3. Сейсмограммы события 29.04.2002 20:20:39, зарегистрированные сейсмостанциями FFN (слева) и HRM (справа), отфильтрованные в частотном диапазоне 2,5-7,5 Гц

Штрихпунктирные линии – записи с каналов NS, сплошные линии - модули сигналов. Начала временных рядов - времена вступления Р-волн

### Результаты и обсуждение

В результате апробации методики получена зависимость средней по событиям добротности от частоты (Рис. 4).

Относительная погрешность в расчетах добротности земной коры составила 3%, что, безусловно, является большим преимуществом данной методики.

Недостатком данной методики можно считать большую трудоемкость, необходимость визуального просмотра и анализа отфильтрованных сейсмограмм с двух станций. Также высоки критерии выборки сейсмограмм: необходимо выбирать записи с высоким соотношением сигнал/шум и схожей формой первых периодов вступившей волны.

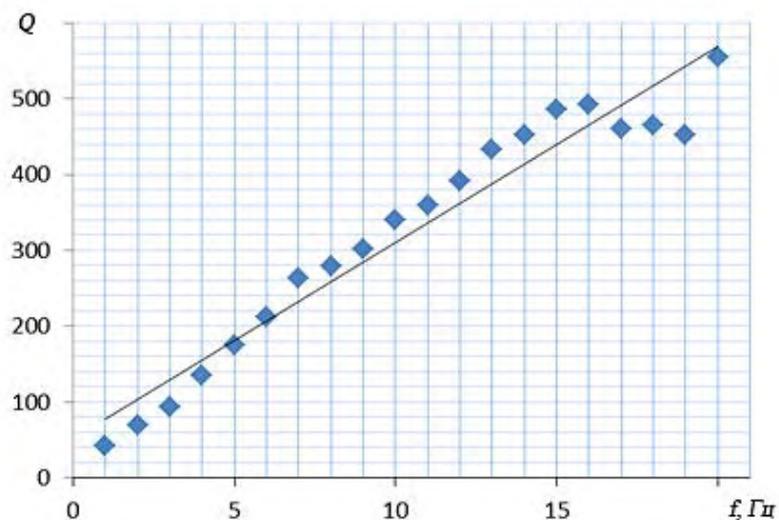


Рис. 4. Зависимость измеренной добротности от частоты

### **Заключение**

В ходе выполнения работы был произведен расчет добротности земной коры центральной части Байкальской рифтовой зоны тремя различными методиками. Два метода, основанных на вычислении затухания по кода-волнам, дали довольно грубые результаты. Предложенный метод расчета добротности земной коры, основанный на сравнении величин амплитуд сигнала одного события зарегистрированного двумя сейсмостанциями, расположенными на пути движения волны, показал наибольшую достоверность.

### **Список литературы**

1. Добрынина А.А., Чечельницкий В.В., Саньков В.А. Сейсмическая добротность литосферы юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы // Геология и геофизика. – 2011. – №5. – С. 712-724.
2. Предеин П.А., Тубанов Ц.А., Герман Е.И. Изучение затухания сейсмических волн в земной коре Байкальского рифта методом нормализации // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXVI Всероссийской молодежной. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2015. С. 140–142.
3. Aki K., Chouet B., Origin of the coda waves: source, attenuation and scattering effects // Journal of Geophysical Research. – 1975. № 80 (23). – P. 3322-3342.
4. Battaglia, J., Aki. K., Location of seismic events and eruptive fissures on the Piton de la Fournaise volcano using seismic amplitudes // Journal of Geophysical Research. – 2003. № 108(B8). – P. 2364-2375.
5. Eibl E., Bean C., Persistent shallow background microseismicity on Hekla volcano, Iceland: A potential monitoring tool. // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2014. №289. – P. 224-237.
6. Parvez I., Yadav P., Attenuation of P, S and Coda Waves in the NW-Himalayas, India. // International Journal of Geosciences. – 2012. № 3. – P. 179-191.
7. Taisne B., Brenguier F. Imaging the dynamics of magma propagation using radiated seismic intensity // Geophysical research letters. – 2011. Vol. 38. – P. 1029-1034.

**ВАРИАЦИИ КОНЦЕНТРАЦИЙ РАСТВОРЕННОГО РАДОНА В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ ЮЖНОГО ПРИБАЙКАЛЯ И ПРОГНОЗ ВРЕМЕНИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

**Семенов Р.М., Лопатин М.Н.**

*Институт земной коры СО РАН, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Институт земной коры СО РАН, e-mail: semenov@crust.irk.ru*

Известно, что при формировании очагов землетрясений происходят изменения различных геофизических полей, а также состава подземных вод и концентраций в них химических элементов и газов. Данные по ним накануне подземных толчков используются в качестве краткосрочных предвестников землетрясений. С этой целью в Южном Прибайкалье начаты исследования вариаций концентраций растворенного радона в подземных водах.

Ключевые слова: очаг землетрясения, концентрации растворенного радона, предвестники землетрясений

**VARIATIONS IN THE CONCENTRATION OF DISSOLVED RADON IN GROUNDWATER OF THE SOUTHERN BAIKAL REGION TIME AND FORECAST OF EARTHQUAKE**

**Rudolf M. Semenov, Maksim N. Lopatin**

*Institute of the Earth Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 128 Lermontova Str., e-mail: semenov@crust.irk.ru*

It is known that the formation of the centers of earthquakes there is a change of various geophysical fields, as well as the ground water and the concentrations of these chemicals and gases. Data for him on the eve of earthquake used as a short-term earthquake precursors. To this end, in the Southern Baikal region started the study of variations of concentrations of dissolved radon in groundwater.

Keywords: the earthquake, the concentration of dissolved radon, earthquake precursors

**Введение**

Наиболее сложным и до сих пор трудноразрешимым в деле прогноза землетрясений является краткосрочный прогноз времени их возникновения. Несмотря на то, что установлены многочисленные геолого-геофизические и другие предвестники, к настоящему времени имеется лишь несколько успешно предсказанных подземных толчков, в результате которых проводились эвакуации населения накануне разрушительных землетрясений, и тем самым

## **СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ**

были спасены десятки и сотни человеческих жизней. Исследования по прогнозу землетрясений проводятся во многих сейсмоактивных регионах не только России, но и в Мире.

**Гидрогеохимические исследования в Южном Прибайкалье** с целью поисков предвестников времени возникновения землетрясений были начаты еще в 70-е годы прошлого столетия [1]. Однако, ввиду их краткосрочности и разрозненности, существенных результатов получено не было. С 2005 г. начаты исследования содержания растворенного гелия в глубинной воде оз. Байкал. Работ подобного плана в открытых глубоководных бассейнах, расположенных в сейсмоактивных районах нигде в мире ранее не проводилось. Именно на основании этого подхода, правда, ретроспективно, был определен предвестник сильного Култукского землетрясения ( $K=15.9$ ;  $M=6.3$ ), произошедшего 27 августа в акватории Южного Байкала [6, 7].

С 2009 г. нами в Южном Прибайкалье начаты исследования вариаций растворенного радона в подземных водах с целью поисков предвестников времени возникновения землетрясений. Концентрации радона определяются в пробах воды, отобранных из самоизливающейся скважины глубиной 787 м, расположенной в пос. Зеленый Мыс в 20 км к северу от южного побережья Байкала. Скважина обсажена до глубины 500 м, что исключает возможность смешения глубинных вод, несущих растворенный радон с грунтовыми водами и тем самым исказить значения его первичных концентраций.

Ранее было предложено проводить исследования растворенных газов в подземных водах в зонах разломов [9], с которыми связаны землетрясения. Именно поэтому для прогноза сейсмических явлений по радиоизотопным параметрам первостепенный интерес представляет изучение вод разломов. В связи с этим мы гидрогеохимические наблюдения проводили на скважине, пробуренной в грабенообразной долине р. Ангары, приуроченной к Ангарскому разлому [3]. Он на карте разломов Юга Восточной Сибири показан в виде скрытых под четвертичными отложениями тектонических нарушений по обоим берегам р. Ангары. Согласно геологической съемки масштаба 1:50 000, его наличие подтверждается геофизическими данными: в своей северо-западной части он выделяется как ось зоны градиентов магнитного поля, а в юго-восточном направлении фрагментарно выражен в виде оси зоны срыва корреляции магнитных аномалий. В гравитационном поле ему отвечает зона градиентов, значения которых увеличиваются с юго-востока на северо-запад. Кроме этого северо-западная часть разлома подтверждается сейсморазведочными данными. Заложение разлома относится к протерозою, а с позднего мезозоя отмечается его активизация в связи с тектоническими движениями в южном горном обрамлении Сибирской платформы. Юго-восточное окончание разлома пересекается с Обручевским активизированным разломом. К узлу пересечения приурочены эпицентры как слабых, так и довольно сильных подземных

## СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ

толчков, зарождение которых может отражаться в гидрогеохимических предвестниках землетрясений.

Отбор проб воды на анализ производится ежедневно. В основу методики измерения объемной активности радона в воде заложен процесс барботажа, который создается путем прокачки очищенного атмосферного воздуха в виде мелких пузырей через объемный эквивалент водной пробы, что позволяет вытеснять растворенный радон и сорбировать его в колонке с активированным углем [5]. В последующем этапе сорбционная колонка экспонируется в течение трех часов для того, чтобы радон вошел в состояние равновесия со своими дочерними продуктами распада:  $^{214}\text{Pb}$  и  $^{214}\text{Bi}$ , – так как измерение производится в блоках бета-детектирования прибора (тип «Камера-01»). Объемная активность радона в воде ( $C_{Rn}$ ; Бк/л) вычисляется по измеренной активности в угле ( $A$ , Бк) с учетом времени между отбором пробы и началом измерения ( $t$ , ч) и постоянной распада радона ( $\lambda$ ; 0,00755 1/ч):

$$C_{Rn} = 0,78 \cdot A \cdot \exp(\lambda \cdot t)$$

Полученные данные оперативно обрабатываются, по ним строятся графики вариаций концентраций, что позволяет по характерным формам кривых на графиках, фиксировать краткосрочные предвестники землетрясений [4].

За последние 6 лет проанализированы графики, обусловленные несколькими десятками землетрясений различных энергетических классов, очаги которых располагались на различных расстояниях от пункта гидрогеохимических наблюдений (по данным БФ ГС СО РАН, [www.seis-bykl.ru](http://www.seis-bykl.ru)). При этом в расчет принимались лишь те из них, условная энергетическая характеристика ( $K'$ ) которых в пункте наблюдения была  $K' > 5.0$  и, которые, по мнению В.Л. Барсукова с коллегами [2], могли оказывать влияние на изменения концентраций радона и гелия в пункте гидрогеохимических наблюдений. Рассчитывалась она по формуле:

$$K' = K - A \lg R,$$

где  $K'$  - условная энергетическая характеристика;  $K$  – энергетический класс землетрясения (десятичный логарифм энергии);  $A$  – специально подобранный численный коэффициент равный 2,5;  $R$  – расстояние от эпицентра землетрясения до точки наблюдения, км (табл. 1).

Поскольку наши исследования направлены на поиски краткосрочных (дни-часы) предвестников землетрясений, мы рассматриваем изменения концентраций в пределах недельного срока до землетрясения. Именно в этот отрезок времени накануне землетрясений отмечается время экстремума, соответствующее краткосрочному предвестнику. Для этого с графиков изменений содержаний радона для расчетов мы брали время экстремума (перегиба кривой) до момента землетрясения.

Землетрясения Южного Прибайкалья за 2009-2015 гг. и их условная энергетическая характеристика в пункте гидрогеохимических наблюдений пос. Зеленый Мыс

Землетрясения								Пункт гидрогеохимических наблюдений
Дата землетрясения			Время землетрясения (по Гринвичу)		Координаты эпицентра землетрясения		Энергетический класс землетрясения	Эпицентральное расстояние, км от водозабора и условная энергетическая характеристика землетрясения, $K'$ в пункте наблюдения (Зеленый Мыс)
год	м-ц	день	час	мин	с.ш.	в.д.	$K$	L/ $K'$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2009	06	14	10	30	51.70	104.07	10.0	58/5.6
2009	07	26	05	27	52.35	106.84	10.9	155/5.4
2009	08	04	16	20	50.80	96.70	14.2	220/8.3
2009	11	19	10	04	51.68	104.54	9.6	46/5.4
2010	02	08	11	55	51.90	105.56	10.3	70/5.7
2010	02	25	04	27	52.19	105.90	11.8	78/7.0
2010	03	19	09	30	54.49	110.11	13.9	500/7.1
2010	07	26	07	18	52.57	106.49	10.9	137/5.5
2010	09	27	13	00	53.26	108.51	12.4	280/6.3
2010	10	27	13	18	52.04	105.68	10.0	72/5.3
2010	10	31	17	29	51.86	105.25	9.5	52/5.2
2010	12	17	16	46	51.85	105.22	9.6	50/5.3
2010	12	20	02	47	51.85	105.26	9.8	52/5.5
2011	01	07	20	57	51.87	105.45	9.9	65/5.4
2011	02	01	12	53	50.97	107.85	13.1	260/7.1
2011	03	18	10	26	52.81	106.71	10.5	166/5.1
2011	06	02	12	30	51.92	105.26	9.9	50/5.6
2011	06	05	06	51	51.90	105.30	9.5	53/5.2
2011	07	06	18	46	52.12	105.58	10.0	66/5.4
2011	07	16	18	38	52.88	108.49	14.5	278/8.4
2011	10	14	07	32	52.60	107.20	11.3	185/5.6
2011	10	28	15	33	52.94	107.30	11.2	203/5.4
2011	11	09	15	23	52.03	105.63	11.2	70/6.6
2011	12	27	15	21	51.80	95.90	15.9	600/8.9
2012	01	12	04	45	51.75	106.16	11.7	115/6.5
2012	02	20	03	27	52.15	106.37	10.9	120/5.7
2012	02	25	06	13	51.87	95.99	16.3	605/9.3
2012	04	07	10	20	52.62	106.53	10.4	143/5.0
2012	06	14	18	40	51.67	103.97	9.8	67/5.2
2012	07	27	03	58	51.68	96.02	13.4	590/6.5
2012	08	14	18	57	51.45	104.19	10.4	80/5.6
2012	08	26	10	43	51.75	104.59	10.4	40/6.4
2012	10	30	10	11	53.40	108.00	11.7	270/5.6
2012	12	29	00	07	52.06	105.72	11.0	78/6.3
2013	01	04	22	23	55.24	109.28	11.9	480/5.2
2013	01	08	11	51	51.85	105.16	11.2	47/7.0
2013	03	15	21	35	51.92	105.33	9.5	55/5.1
2013	05	10	13	22	51.88	105.37	9.9	58/5.5

**СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ**

2013	06	07	23	16	51.68	103.87	9.9	70/5.3
2013	07	08	09	20	51.66	104.56	10.3	50/6.1
2013	08	11	18	50	51.68	104.45	9.6	47/5.4
2013	11	03	06	14	52.00	99.04	12.4	375/6.0
2014	04	25	01	44	51.59	104.42	10.7	57/6.3
2014	07	07	22	41	53.28	108.48	11.3	290/5.1
2014	07	20	06	36	51.72	104.40	9.6	46/5.4
2014	09	01	20	10	50.90	103.27	11.4	162/5.9
2014	11	01	00	51	52.58	101.26	13.5	220/7.6
2014	11	16	01	11	52.66	106.55	10.6	142/5.2
2014	12	05	18	04	51.37	100.63	13.6	290/7.4
2014	12	05	18	25	51.37	100.66	11.7 афт.	285/5.5
2014	12	22	03	05	53.04	108.09	12.3	255/6.2
2014	12	23	02	14	56.03	113.89	12.6	742/5.4
2015	01	05	06	04	56.11	113.75	13.1	742/5.9
2015	01	13	05	41	52.08	105.66	10.7	742/6.0
2015	01	18	06	41	56.15	113.70	13.1	742/5.9
2015	01	18	23	06	56.09	113.77	13.0	745/5.9
2015	03	13	04	11	56.09	113.92	12.3	80/5.1
2015	04	06	07	47	53.13	108.28	12.6	275/6.5
2015	04	20	23	31	53.45	108.32	11.4	292/5.2
2015	04	29	07	16	52.00	105.60	10.0	75/5.3
2015	06	21	14	31	53.46	109.10	12.3	350/5.9
2015	07	07	14	15	55.70	110.36	13.0	550/6.1
2015	07	08	20	04	49.05	100.89	11.8	425/5.2
2015	07	13	04	15	52.23	107.93	11.5	235/5.5

А.Я. Сидориным был предложен расчет зависимости времени проявления предвестников землетрясений от эпицентрального расстояния и его энергетического класса [8], используя который, мы по полученным данным рассчитали уравнение регрессии (Рис. 1):

$\lg(RT)$

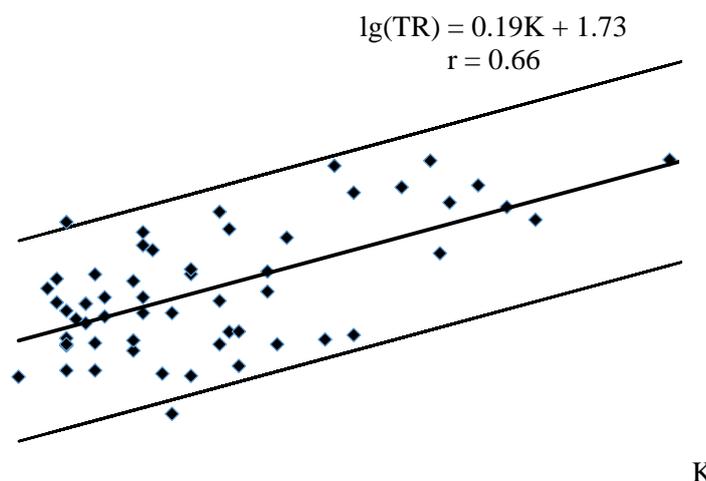


Рис. 1. Зависимость функции  $\lg(TR)$  от энергетического класса землетрясений К  
(Т – в часах, R – в км)

## **СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ**

На рисунке пунктирными линиями показан 95% доверительный интервал при коэффициенте корреляции 0.66. Если убрать две точки, которые выходят за этот интервал (поскольку они являются сдвоенными подземными толчками), то зависимость будет иметь вид  $\lg(TR) = 0.20K + 1.67$ , а коэффициент корреляции составит 0,70. Согласно полученному уравнению можно рассчитать время краткосрочного предвестника землетрясения по его энергетическому классу и эпицентральному расстоянию.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 14-05-00245) и проекта 4.1.*

### **Список литературы**

1. Бадминов П. С., Лопатин М. Н., Семенов Р. М., Тубанов Ц. А., Крюкова И. Г., Оргильянов А. И. Изучение газового состава подземных и глубинных вод озера Байкал с целью поиска предвестников землетрясений / Фундаментальные и прикладные проблемы гидрогеологии. Материалы XXI Всероссийского совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным участием. Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. 2015. С. 245-249.
2. Барсуков В.Л., Беляев А.А., Бакалдин Ю.А., Игумнов В.А., Ибрагимов Т.Л., Серебренников В.С., Султанходжаев А.Н. Геохимические методы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1992. 213 с.
3. Карта разломов Юга Восточной Сибири. Масштаб 1:1 500 000. / Александров В.К., Дёмин А.Н., Мордовская Т.В., Таскин А.П., Хренов П.М., Лебедев С.П. Редактор П.М. Хренов. Иркутск: Мин-во геологии СССР. ВОСТСИБНИИГТ и МС. 1982.
4. Киссин И.Г. О соотношениях между предвестниками землетрясений и постсейсмическими эффектами // ДАН. 1997. Т. 354. № 6. С. 804-807.
5. Методика измерений содержания радия и радона в природных водах. М.: НТЦ «Нитон», 1993. 6 с.
6. Семенов Р.М., Имаев В.С., Смекалин О.П., Чипизубов А.В., Оргильянов А.И. Гелий в глубинной воде Байкала предвестник землетрясений // ДАН. 2010. Т. 432. № 4. С. 533-536.
7. Семенов Р.М., Смекалин О.П. Сильное землетрясение на Байкале 27 августа 2008 г. и его предвестники // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 4. С.521-528.
8. Сидорин А.Я. Зависимость времени проявления предвестников землетрясений от эпицентрального расстояния // ДАН. 1979. Т. 245. № 4. С. 825-828.
9. Чалов П.И., Тузова Т.В., Алехина В.М. О прогнозе землетрясений по изменениям радиоизотопных параметров вод разломов земной коры // Физика Земли. 1977. №8. С. 56-60.

**НОВЫЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ  
ОПАСНОСТИ СТОЛИЦЫ МОНГОЛИИ**

**О.П. Смекалин<sup>1</sup>, А.В. Чипизубов<sup>1</sup>, В.С. Имаев<sup>1</sup>, С. Дэмбэрэл<sup>2</sup>, Д. Баттогтох<sup>2</sup>, Н.Н. Гриб<sup>3</sup>,  
А.А. Сясько<sup>3</sup>, А.В. Качаев<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, РФ; smekalin@crust.irk.ru*

<sup>2</sup> *Исследовательский центр астрономии и геофизики МАН, г. Улан-Батор, Монголия*

<sup>3</sup> *Технический институт (филиал) Северо-Восточного Федерального Государственного  
Университета, г. Нерюнгри, РФ.*

По результатам морфометрических исследований, тренчинга, геофизических работ и радиоуглеродного датирования Хустайской, Гунжинской и Верхнекеруленской дислокаций были получены следующие характеристики палеоземлетрясений. Протяжённость сейсмогенного вскрытия зон разломов для названных дислокации составляют 100, 20 и 100 км соответственно (на основе данных дистанционных методов). Амплитуды разовых вертикальных смещений, установленные по морфометрии и тренчингу составляют 2.5 м, менее 1 м и 1.3 м соответственно. На основе вновь полученных материалов по кинематике деформаций исходя из эмпирической зависимости для взбросо-сдвигов активизированных платформ [Чипизубов, 1988] рассчитаны значения  $M_{max}$ , которые составили 7.4 для Хустайского, 7.0 для Гунжинского и 7.1 для Керуленского сейсмогенерирующих разломов.

Ключевые слова: Хэнтэй-Даурский мегасвод, палеоземлетрясение, абсолютный возраст палеоземлетрясения.

**NEW GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL DATA TO ASSESS THE SEISMIC HAZARD  
OF THE CAPITAL OF MONGOLIA**

**O.P. Smekalin<sup>1</sup>, A.V. Chipizubov<sup>1</sup>, V.S. Imaev<sup>1</sup>, S. Demberel<sup>2</sup>, D. Battogtoh<sup>2</sup>,  
N.N. Grib<sup>3</sup>, A.A. Syasko<sup>3</sup>, A.V. Kachaev<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Institute of the Earth Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 128  
Lermontova Str., e-mail: imaev@crust.irk.ru;*

<sup>2</sup> *Research Center for Astronomy and Geophysics, MAN, Ulaanbator, Mongolia*

<sup>3</sup> *Technical Institute (branch of) North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov in  
Nerjungry, 16 Kravchenko Str., email: grib@nfygu.ru*

According to the results of morphometric studies, trenching, geophysical surveys and radiocarbon dating Hustai, Gunzhin and Verhnekerulen dislocations following options are obtained for prehistoric earthquakes. The length of the seismogenic opening of the fault zones for these dislocations are 100, 20 and 100 km, respectively

**СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ** (based on remote sensing methods). The amplitudes of the single vertical displacements established by morphometry and trenching up to 2.5 m, 1 m and 1.3 m, respectively. On the basis of the newly received materials on the kinematics of deformation based on empirical relationship for the reversed strike-shifts activated platforms [Chipizubov, 1988] calculated values  $M_{max}$ , which amounted to 7.4 for Hustai, 7.0 and 7.1 for Gunzhin Kerulen seismogenic faults.

Keywords: Khentei-Dauria dome, paleoearthquake, absolute paleoearthquake age.

## Введение

С наступлением эры цифровой регистрации сейсмических колебаний и расширения сети сейсмических станций в южной части Хэнтэйского нагорья (Центральная Монголия), были выявлены новые закономерности проявления сейсмичности в этом регионе. В эпицентральной зоне на фоне равномерно рассредоточенных эпицентров нижнего магнитудного уровня ( $M < 2-3$ ) отмечаются отдельные скопления эпицентров той же энергии в виде изометричных и линейных форм. Некоторые из таких скоплений расположены в непосредственной близости от столицы Монголии – города Улан-Батора, и трассируют зоны активных разломов. Кроме того, мониторинг сейсмических событий показал значимые всплески числа землетрясений в 2005, 2009 и в 2010 годах. Среди ощутимых событий можно отметить три землетрясения с магнитудой 4.0–4.2 с эпицентральными расстояниями не более 100 км от г. Улан-Батора, зарегистрированные в 2008–2009 годах. Решение ряда научных задач, связанных с возможной активизацией сейсмического процесса, потребовало принятие правительственной программы изучения сейсмобезопасности Улан-Батора, к выполнению которой были привлечены ведущие специалисты сейсмологи и сейсмогеологи из Западной Европы и России. Некоторые результаты исследований представлены в настоящей публикации.

**Краткие сведения о геологических условиях проявления сейсмичности в южной части Хэнтэйского нагорья.** Выделенные и изученные в последние годы сейсмогенные структуры, определяющие потенциал сейсмической опасности города Улан-Батор, располагаются на юге Хэнтэйского нагорья, которое в свою очередь является частью хорошо выраженного в современном рельефе Хэнтэй-Даурского мегасвода площадью около 600 тыс. км<sup>2</sup>. В строении мегасвода выделяют две зоны – внутреннюю (ядро), пространственно совпадающую с Хэнтэй-Даурским нагорьем, и внешнюю – подножье. В плане мегасвод имеет форму неправильного эллипса с северо-восточным простиранием длинной оси. С запада и северо-запада он граничит с активными структурами Байкальского и Хангайского сводов. На границах с этими структурами, а также в кольцевом подножии проявляется наибольшая ( $M > 7$ ) сейсмическая активность мегасвода. Сейсмичность же внутренней области мегасвода

## **СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ**

обладает меньшим потенциалом, однако местные землетрясения могут представлять определённую угрозу близлежащим населённым пунктам, промышленным объектам.

Существующий сегодня высокогорный контрастный рельеф Хэнтэйского нагорья формируется с позднепермского времени. Период максимальной интенсивности тектонических движений был пройден в конце первой половины мезозоя. К тому времени относится и заложение практически всех существующих сегодня межгорных впадин. В кайнозой тектоническая активность снижается, о чём свидетельствует «консервация» рельефа, постепенное закрытие мезозойских впадин. Активные тектонические процессы, выраженные в виде восходящих движений, переместились из внутренней области Хэнтэйского нагорья на его периферию.

Потенциальная сейсмичность внутренней области нагорья связана с активными разломами, контролирующими борта мезо-кайнозойских впадин, а также с активизацией древних шовных элементов, таких как границы Хангай-Хэнтэйского синклиория. О былых сейсмических катастрофах свидетельствуют эскарпы в позднечетвертичных и голоценовых осадках, изгибовые деформации в отложениях предгорных шлейфов и иные формы рельефа, сейсмогенность и связь с глубинными разрывами которых подтверждаются основными результатами исследований, вкратце приведенных ниже.

### **Методы исследований**

Сейсмогенные деформации в разломах исследуемой территории детально изучены комплексом сейсмогеологических методов с применением тренчинга, морфометрии и геофизики [Демберел и др., 2010; Ferry et al., 2010; Смекалин и др., 2013; и др.]. Тренчинг – изучение сейсмодетформаций в разрезах канав, выполняется с целью подтверждения генезиса выраженных в рельефе деформаций, уточнения их кинематики, разовых амплитуд смещения, а также определения возраста и повторных периодов сейсмособытий.

Для морфометрических исследований в полевых условиях традиционно используются рейки с электронными угломерами. При составлении планов и схем, определения линейных размеров дислокаций и их кинематики в последнее десятилетие широко применяются различные материалы дистанционного зондирования. Особенно хорошо зарекомендовали себя годные для компьютерной обработки объёмные модели рельефа, полученные лазерным сканированием поверхности Земли. Точность этих материалов достигает 30 см по вертикали (в зависимости от масштаба съёмки) и сравнима с данными, получаемыми при наземных обследованиях.

Для электроразведочных работ использовалась аппаратура ЭРА-МАХ производства НПО «ЭРА», г. Санкт-Петербург. Исследования выполнялись установкой методом ДОЗ с шагом между точками зондирования 10 – 20 метров (расстояние между электродами А и В 10

## **СЕЙМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ**

метров; расстояние между электродами М и N приемного диполя 10 метров). Максимальный разнос ОО' составил 150 м. Работы проводились с применением заземленного источника возбуждения (излучающего диполя) с величиной силы тока в питающей линии от 20 до 200 мА в зависимости от условий заземления и при стабилизированном токе на частоте 625 Гц. Использованный максимальный разнос установки обеспечил глубину исследований до 40 метров.

Сейморазведочные работы были выполнены по методике КМПВ с возбуждением сейсмических волн темпером (ударами кувалды). Регистрация сигнала выполнена 24-канальной цифровой сеймостанцией «Сейсмолог-24» производства ООО «АйСиЭс», г. Хабаровск. При исследованиях применялись вертикальные сеймоприемники с собственной частотой колебаний 20 Гц. Шаг между сеймоприемниками 5 метров. Общая длина сейморазведочной косы 115 м. Исследования проводились по схеме с четырьмя пунктами возбуждений – выносные пункты возбуждения в 30 метрах от ближайшего сеймоприемника, концевые – в 2,5 метрах. Запуск записи производился по сигналу пускового сейсмодатчика, расположенного вплотную к точке возбуждения. Длительность записи 1024 мс. Дискретность записи – 0,5 мс. Для подавления помех полевые исследования проводились по методике многократных возбуждений в пункте взрыва. При первичной обработке полевых данных сейсмограммы одного пункта возбуждения суммировались. Суммирование позволило подавить случайные шумы и поднять уровень полезного сигнала. После суммирования полевых сейсмограмм дальнейшая интерпретация производилась по стандартному графу обработки данных сейморазведки КМПВ.

Для георадиолокационных исследований использован комплект аппаратуры ОКО-II производства НПО «Логис», г. Раменское, Российская Федерация. В качестве антенного блока использован АБДЛ «Тритон» – незранированный антенный блок с дипольными излучателями частотой 50 и 100 МГц и глубиной исследований до 20 м. При исследованиях выполнялось двукратное профилирование – прямой ход с частотой излучателя 100 МГц и обратный ход с частотой излучателя 50 МГц. Обработка полевых радарограмм проводилась с применением программного обеспечения GeoScan производства НПО «Логис».

### **Основные результаты исследований**

Изученные Хустайская, Гунжинская и Верхнекеруленская сейсмогенные дислокации на юге Хэнтэйского поднятия локализируются последовательной цепочкой в полосе системы разломов северо-восточного простирания. Это основная ориентация для структур Хэнтэй-Даурского мегасвода, развивающихся с раннепалеозойского времени. В общем, для геологических образований (складки, дайки, трещиноватость) этого района характерна

## СЕЙМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ

северо-западная вергентность. Приведенные ниже отдельные результаты исследований наиболее характерны для сейсмогеологической ситуации Южного Хэнтэя.

Геофизические профили, пересекающие сейсмогенный уступ, несут информацию об основных параметрах деформаций по зоне Хустайского разлома: амплитуде смещений и кинематике подвижки (Рис. 1). Первые пикеты профилей расположены выше бровки уступа, где в отдельных местах отмечаются выходы коренных выветрелых пород. Располагающиеся вблизи поверхности высокоомные образования коренных пород перекрывают слои со значительно более низким удельным сопротивлением. Подошва высокоомных аномалий прямолинейна и полого погружается в сторону хребта до глубин 15–20 м под отметками нулевых пикетов. К участку профилей на склоновой части уступа приурочены сгущения разрывных нарушений в приповерхностном слое по материалам георадарной съемки. По данным КМПВ для профилей характерен наклон преломляющих границ в сторону хребта, что является одним из признаков надвиговой кинематики. На некоторых профилях отчетливо выделяется пилообразная форма поверхности преломляющего горизонта и свидетельствует о блоковой структуре деформированной неогеновой толщи.

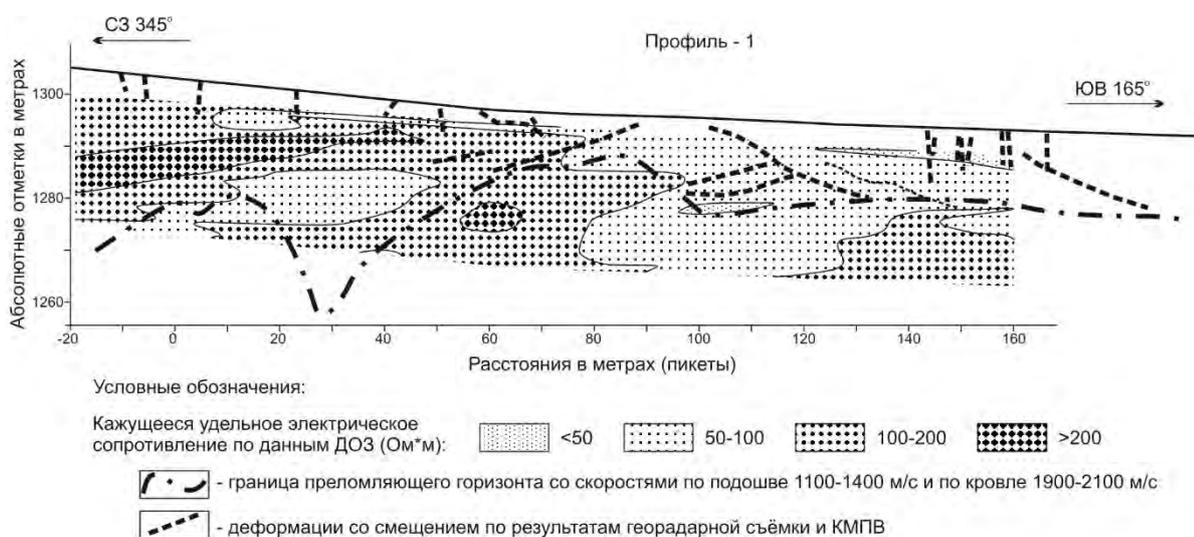


Рис. 1. Синтезированная схема геофизических исследований по профилю 1.

Показательным является разрез канавы, вскрывшей уступ в зоне Керуленского разлома. На схеме (Рис. 2) представлен разрез южной стенки канавы. Канавой пройдены слоистые аллювиально-пролювиальные отложения, лежащие на перемещённом элювии, которые совместно деформированы полого наклонными (около 30°) сейсмогенными трещинами. В стратиграфической последовательности слоёв отражены этапы формирования уступа. В основании разреза чередуются перемещённые элювиальные образования двух видов (слои A1 и A2), состоящие из плотной песчано-дресвяно-мелкощепнистой массы.



Рис. 2. Схема документации канавы в зоне Керуленского разлома

Условные обозначения: 1 – современный почвенно-растительный слой; 2 – погребные почвенные слои, тёмно-коричневые и бурые супеси и суглинки; 3 – супеси, пески; 4 – дресва, гравий; 5 – дресва, гравий, мелкий щебень; 6 – щебень, мелкие глыбы; 7 – места отбора проб (на выносках: в числителе – лабораторный номер, в знаменателе – радиоуглеродный возраст); 8 – индексы слов и разломов; 9 – разрывные нарушения отчётливо (сплошная линия) и слабо (пунктирная линия) выделяющиеся в стенке канавы.

Границы между этими образованиями чёткие, линейные, представляющие собой плоскости смещения сейсмогенных подвижек, для которых характерно общее западное направление падения. Кровля элювия перекрыта щебнистым пролювием (слой  $B_1$ ). Форма изгиба контакта в некоторой степени передаётся вышележащим слоям, что свидетельствует о молодом возрасте складкоподобных форм и о горизонтальном сжатии, как основном источнике механизма деформаций, вскрытых канавой. Основные маркирующие горизонты – два слоя щебёнки ( $B_1$  и  $B_2$ ) и «жёлтый» дресвяно-песчано-щебнистый слой ( $E$ ) – прослеживаются вдоль всего разреза канавы. Наличие непротяжённых слоёв и прослоев обусловлено особенностью осадконакопления и сноса. В разрезе отсутствуют коллювиальные клинья, формирование которых невозможно без возникновения свободной поверхности при росте уступа. По характеру залегания слоёв их видимый флексуобразный изгиб является основным проявлением сейсмогенной деформации. Изгибовые деформации сопровождались образованием полого наклонных трещин в осадочной толще, заключённой между нижним и верхним слоями щебня. Раскрытие этих трещин, проявившееся для наиболее плотных слоёв, может свидетельствовать о косом сжатии по отношению к простиранию трещин и наличию сдвиговой компоненты. Некоторые трещины развиты лишь в пределах осадочных слоёв, другие прослеживаются и в элювии, и имеют унаследованную природу.

Сейсмотектоническая активизация последнего этапа отражена в деформациях осадочной толщи, перекрывающей элювиальные образования. Эти деформации представлены в виде трещин, в том числе и трещин раскрытия, а также в виде волнообразной формы поверхности на границе раздела слоёв. Волновым деформациям последнего этапа также

## **СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ**

подвержены элювиальные отложения. Трещины деформируют всю толщу осадков, за исключением современного почвенно-растительного слоя.

Из представленного разреза можно сделать вывод о двух этапах сейсмоструктурной активизации, разделённых процессами нивелировки сейсмогенных форм рельефа, сформированных на раннем этапе. О тектонических подвижках раннего этапа свидетельствуют деформации в элювиальной толще, представленные трещинами с наклоном сместителя от первых градусов до 30–40° и общим для всех азимутом падения около 310°. Видимая амплитуда смещения по отдельным разрывам превышает 1.5 метра. Деформации выполнены в виде пластинчатых (чешуйчатых) надвигов.

Деформации в пределах Гунжинского разлома имеют явные признаки правостороннего латерального смещения, суммарная амплитуда которого по Z-образному изгибу бровки цокольной террасы в левом борту р. Ундулун, составляет 25 м. В канаве, вскрывшей Гунжинский разлом, установлены трещины отрыва с амплитудой около 1 м. Закономерным образом расположенные валы сжатия и трещины растяжения, подтверждённые геофизикой и результатами вскрытия деформаций, также свидетельствуют о правосторонней подвижке. Гунжинский разлом хоть и наследует зону древнего контакта, как и разломы Хустайский и Верхнекеруленский, однако в отличие от них, новейший этап его активизации начался значительно позже – в период закрытия Тольской и Керуленской впадин, когда интенсивное осадконакопление в мезозое сменилось в кайнозойское время образованием в бортах впадин взбросо-надвигов. О «молодости» Гунжинского разлома свидетельствует его индифферентность к макроформам современного рельефа.

Для определения абсолютного возраста палеособытий на территории Южного Хэнтэя из шести канав трёх палеосейсмогенных структур было отобрано и датировано по <sup>14</sup>C 18 проб (Рис. 3). В большинстве случаев, это гумусированные супеси или суглинки от светло-коричневого до тёмно-бурых цветов. В разрезах канав Гунжинского и Хустайского разломов [Имаев и др., 2012; Смекалин и др., 2013] нами устанавливались следы как минимум двух разрывообразующих события, получить абсолютный возраст радиоуглеродным методом нам удавалось лишь для самых последних событий. В случае с дислокациями Верхнекеруленской структуры абсолютным возрастом обеспечены два последних события по результатам датирования радиоуглеродным методом четырёх проб.

По результатам морфометрических исследований, тренчинга, геофизических работ и радиоуглеродного датирования Хустайской, Гунжинской и Верхнекеруленской дислокаций были получены следующие результаты. Протяжённость сейсмогенного вскрытия зон разломов для названных дислокации составляют 100, 20 и 100 км соответственно (на основе данных дистанционных методов). Амплитуды разовых вертикальных смещений,

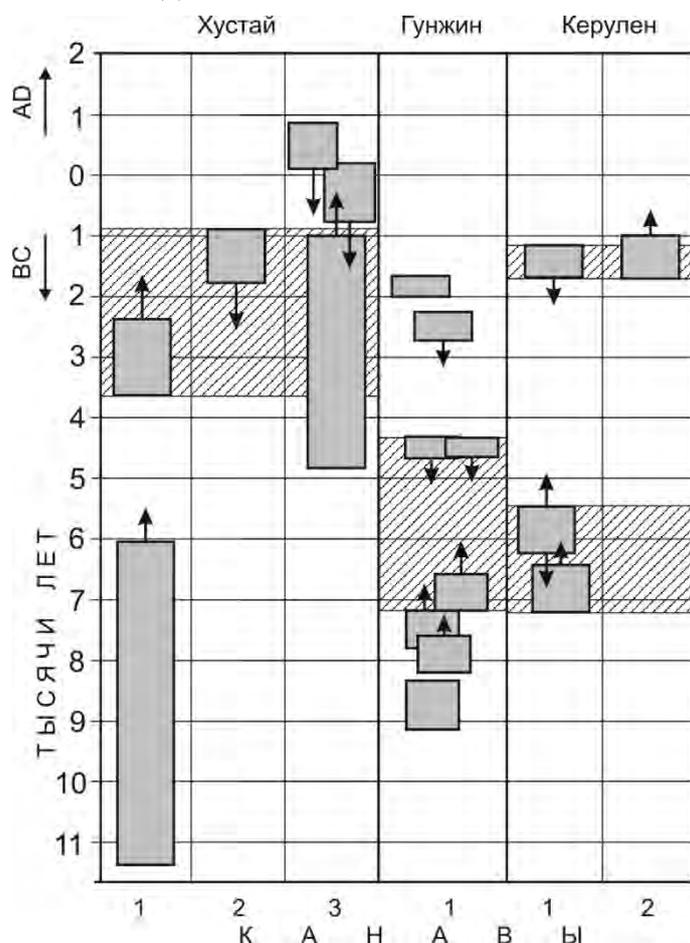


Рис. 3. Схема корреляции календарных (калиброванных) возрастов Южного Хэнтэ

Прямоугольные области с диагональной штриховкой – интервальный возраст палеоземлетрясений. В двух правых колонках серые прямоугольники со стрелками отражают положение калиброванных радиоуглеродных датировок на временной шкале. Высота прямоугольников определяет вероятный интервал формирования почвенного слоя. Стрелка вверх означает, что данная проба отобрана из слоя, деформированного при землетрясении. Стрелка вниз – проба отобрана из слоя, перекрывающего сейсмогенные осадки.

установленные по морфометрии и тренчингу составляют 2.5 м, менее 1 м и 1.3 м соответственно. Суммарная амплитуда правостороннего латерального смещения в зоне Гунжинского разлома составляет 25 м. На основе вновь полученных материалов по кинематике деформаций исходя из эмпирической зависимости для взбросо-сдвигов активизированных платформ [Чипизубов, 1988] рассчитаны значения  $M_{max}$ , которые составили 7.4 для Хустайского, 7.0 для Гунжинского и 7.1 для Керуленского сейсмогенерирующих разломов.

### Список литературы

Демберел С., Батарсурэн Г., Имаев В.С., Стром А.Л., Смекалин О.П., Чипизубов А.В., Гриб Н.Н., Сяско А.А., Качаев А.В. Палеосейсмогенные деформации в окрестностях Улан-Батора по геологическим и геофизическим данным // Вопросы инженерной сейсмологии – 2010. – Т. 37, № 3. – С. 45–54.

## ***СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ***

Имаев В.С., Смекалин О.П., Стром А.Л., Чипизубов А.В., Сясько А.А. Оценка сейсмической опасности г. Улан-Батор (Монгольская Народная Республика) по результатам сейсмогеологических исследований // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53, № 9. – С. 1182–1193.

Металлогенический анализ в областях активизации. Отв. ред. Е.Т. Шаталов. Наука, 1977. 176 с.

Смекалин О.П., Имаев В.С., Чипизубов А.В. Палеосейсмологические исследования в зоне Хустайского разлома (Северная Монголия) // Геология и геофизика. – 2013. – Т.54, № 7. – С. 940–951.

Чипизубов А.В. Выделение одноактных и разновозрастных палеосейсмодислокаций и определение по их масштабам магнитуд палеоземлетрясений // Геология и геофизика, 1998. – Т. 39, № 3. – С. 386–398.

Ferry M., Schlupp A., Ulzibat M., Munsch M., Fleury S., Baatarsuren G., Erdenezula D., Munkhsaikhan A., Ankhtsetseg D. Tectonic morphology of the Hustai fault (Northern Mongolia): A source of seismic hazard for the city of Ulaanbaatar // Geophysical Research Abstracts. 2010. V. 12. EGU 2010-11122.

**СЕЙСМОЛИНЕАМЕНТЫ И РАЗРУШИТЕЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В  
РОССИЙСКОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО ЩИТА: НОВЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ  
ПОСЛЕДНИХ 13 ТЫСЯЧ ЛЕТ**

**Никонов А.А., Шварев С.В.**

*Институт физики Земли РАН, Москва, ул. Б. Грузинская, 10, e-mail: nikonov@ifz.ru*

Кратко изложены результаты многолетних исследований авторов, с учетом работ многих сотрудников других учреждений, по выявлению, идентификации и параметризации письменных сведений и натуральных проявлений ранних и древних сильных землетрясений в пределах российской части Балтийского щита. В основе подхода лежат два тезиса, а именно, о необходимости создания проверенного, усовершенствованного сейсмического каталога за тысячелетия и рассмотрения сейсмичности совокупно с выделяемыми активными разломами. Главные результаты, представленные в виде карт и таблиц, заключаются в 1) выделении 12 сейсмолинементов (вместо одного на Карте ОСР-97) и 2) определении в каждом из них  $M_{max}$  и вероятных интервалов повторения сильных событий по градациям магнитуд. Эти разработки в макетах Карт ОСР-2012 и ОСР-2014 остались не использованными.

Ключевые слова: разрушительные землетрясения, сейсмолинементы, сейсмическая опасность, сейсмический потенциал, палеосейсмологический метод, каталоги землетрясений, сейсмическое районирование, Балтийский щит, Мурманская зона, Ладожский грабен.

**SEISMOGENIC LINEAMENTS AND DESTRUCTIVE EARTHQUAKES IN THE  
RUSSIAN PART OF THE BALTIC SHIELD: NEW APPROACH FOR LONG-TIME  
EVALUATIONS (13<sup>4</sup> YEARS)**

**Nikonov A.A., Shvarev S.V.**

*Schmidt Institute of Earth Physics, RAS, Moscow, Bol. Gruzinskaia str. 10, nikonov@ifz.ru*

Results of many years authors research including achievements of experts of other Institutions are presented shortly. They concerns with revealing, identification and parameterization of strong past earthquakes within the Russian part of the Baltic shield. The authors focused on two initial presumptions, namely, 1) to prepare newly good basic seismic catalogue for thousand years and 2) to analyze seismicity of the region with active faults in common. Main results of the authors' research seems to be as following: 1) new map with singled out 12 seismoligneaments (instead of a single on the map OSR-97) and 2) expert estimation of possible time intervals between events with grades  $M \geq 6.0$ . Elaborated by the authors assessments of seismic regime haven't to be taken into account in course of the maps OSR-2012 and OSR-2014 preparations, what is seems to be the lost chance.

Key words: destructive earthquakes, seismoligneaments, seismic danger, seismic potential, paleoseismological method, seismic catalogues, seismic zoning, Baltic shield, Murmansk zone, Ladoga graben

**Вводные замечания**

Балтийский (Фенноскандинавский) щит в его российской части никогда не считался и, соответственно не отражался на традиционных картах сейсмического районирования (СР) в качестве сколько-нибудь опасной территории (СР-37, СР-68, СР-78, СР-97). В базовом издании 1977 г на этой огромной территории учтено лишь одно событие с  $M=5.4\pm 1.0$  (1626 г.) [8]. Однако к концу 90-х годов XX в. сначала в северной Фенноскандии (К. Лагербек, П. Андерсон и др.), затем на всей территории Швеции (Н.-А. Мернер) и части Финляндии (А. Куйвамяки, П. Вуорела), были обнаружены и подробно изучены геолого-геоморфологические признаки сильнейших землетрясений позднеледникового времени. Позднее начались и с успехом осуществлялись палеосейсмогеологические исследования и в Российской части Балтийского щита, в Карелии (А.Д. Лукашов, И.Н. Демидов) и на Кольском п-ове (С.Б. Николаева, А.В. Спиридонов, Н.В. Шевченко и др.). Систематическую обработку с составлением карт (схем) изосейст и оценкой заново параметров событий (исторический период до 1967 г.) осуществлял А.А. Никонов.

Все эти исследования с полной определенностью показали, что разные части Фенноскандии (Балтийский щит, норвежские каледониды, прилежащие с востока части Восточно-Европейской платформы) испытывали в поздне- и послеледниковое время, вплоть до последних столетий, землетрясения, сильные и даже разрушительные. Выяснилось, что определяемая за одно-два последних столетия слабая сейсмичность не отражает ни реальной сейсмической опасности, ни, тем более, потенциала, в действительности Фенноскандия – это недооцененная сейсмогенерирующая провинция [3]. Это побудило авторов к углубленным дополнительным собственным исследованиям и штудированию региональной литературы в сейсмологическом аспекте. Ниже в сжатом виде изложены главные результаты работы.

**Основы подхода и методика**

Подход авторов предусматривал следующие главные позиции (устремления): 1. Сбор материалов и вовлечение в обработку современными способами геологических, геоморфологических, геофизических и иных материалов разных авторов по проявлениям активных (в поздне- и послеледниковье) разломов и деформаций; 2. Использование всех возможных способов учета и параметризации (с оценками возможных неточностей определения каждого параметра), т.е. сведений получаемых разными методами, за период 12-13 тыс. лет; 3. Обновление каталога землетрясений прошлого, отдельно по периодам ранне-инструментальному, историческому, доисторическому, с последующим, вместе с каталогом периода инструментальных наблюдений, анализом всей совокупности (усовершенствованной базы данных); 4. Выделение сейсмолинеаментов, т.е. линейных зон с признаками активных разломов и эпицентральных зон землетрясений в них, в том числе с  $M\geq 6$ , на всей территории;

5. Анализ пространственно-временных закономерностей сейсмического процесса в масштабе столетий и тысячелетий с целью определения  $M_{\max}$  и интервалов возможного повторения таковых по зонам ВОЗ.

Особым разделом исследований стала работа над каталогом землетрясений, поскольку каталог – это фундамент для долговременных характеристик сейсмичности, оценок максимальной магнитуды  $M_{\max}$ , интенсивности сейсмических воздействий, определения потенциальных очагов землетрясений и др. В дополнение к существовавшим для указанной территории каталогам, составлялись три подкаталога, по специфике исходных сведений и способам обработки каждый: исторический, археосейсмический и палеосейсмический. Землетрясения *ранне-инструментального периода* обрабатывались с учетом и инструментальных записей, и собранных, в том числе заново, макросейсмических данных. *Подкаталог исторических землетрясений*, в отличие от каталогов компилятивных, составлялся первым автором как исследовательский, на основе полного пересмотра и переопределения параметров по заново собранным и критически проанализированным первичным макросейсмическим сведениям в соответствии с современными требованиями и методами работы с историческими источниками. Это позволило, во-первых, избежать ряда неточностей, ошибок и путаницы, вкравшихся во вторичные публикации и затем повторявшихся, и усугублявшихся. Удалось также обнаружить целый ряд редких, забытых или неизвестных вовсе публикаций, как на русском языке, так и на европейских, со сведениями о землетрясениях прошлого. Одним из важных результатов явилось исключение из каталога сотрясений нетектонической природы (провальные, морозобойные и др.).

*Подкаталог для доисторического периода (палеоземлетрясения) по археосейсмическим и геолого-геоморфологическим данным* составлялся с использованием специфических подходов и новых методических разработок. С 1997 г. первым автором, сначала с А.П. Сергеевым, а с 2006 г. с С.В. Шваревым, систематически велись исследования палеосейсмогеологической направленности с полевыми работами, в основном в пределах Ленинградской области, южной части Республики Карелия, а также по южному побережью Финского залива в пределах республики Эстония (частью с А.М. Мийделом). Помимо геологических сведений в массовом порядке привлечены материалы по вторичным нарушениям рельефа и грунтов. На каждом из участков с наиболее выразительными одиночными и/или группирующимися нарушениями авторы стремились полноценно обследовать не по одному объекту, но по нескольким, с тем, чтобы получить сопоставимые сведения для выявления соотношений и характеристик нарушений на данном участке в пространстве и времени, в частности, для определения возникновения нарушений в одно время или в разные периоды, направлений и силы динамических импульсов. Параметризация

## СЕЙМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ

в терминах основных параметров землетрясений осуществлялась на основе принятых сеймотектонических соотношений и разработанной методики параметризации нарушений в скальных породах (на щите) [6, 9]. Составленный таким способ подкаталог по палеоземлетрясениям впервые открыл возможность расширить информацию о сильных,  $M \geq 5.5$  (5.8), землетрясениях в регионе местами до 12-13 тыс. лет.

В результате нового подхода в пределах российской части Балтийского щита вместо 15 землетрясений, причем, только в северной части региона, в базовом каталоге [8] за историческое время (с XVII в. по 1974 г.) для готовившейся Карты ОСР-12 удалось нарастить их число еще на 21 [6], а к 2015 г. их число, возросло до 173. Львиная доля событий обнаружилась не за счет вновь регистрируемых после 1974 г., т.е. за 40 лет, событий, а благодаря вовлечению событий ранних и древних. Сравнение с каталогом и приложенной к нему картой [8] дает ясное представление и достигнутом прогрессе (Рис. 1).

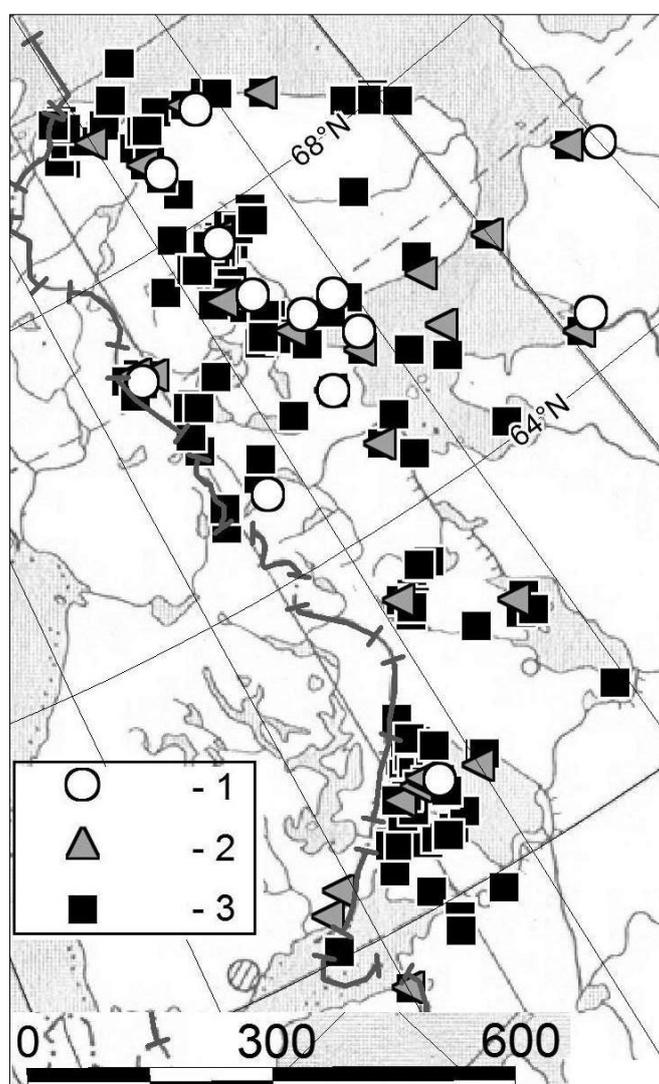


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений, отраженных на Карте ОСР-97 (1); согласно каталогу авторов к 2012 г. (2); согласно расширенному авторскому каталогу, конец 2014 г. (3).

**Отдельные примеры**

Здесь отразим результаты по двум сейсмогенерирующим структурам первостепенной важности – Мурманской и Ладожской. Мурманская зона. В разных частях Мурманского побережья сеймодеформации обнаруживались, хотя и не определялись как таковые, еще до войны А.Ф. Миддендорфом, И.К. Кузнецовым, В.П. Зенковичем, Н.П. Лупановой. В последние десятилетия их фиксировали и идентифицировали многие исследователи: И.Г. Авенариус, С.Б. Николаева, А.В. Спиридонов, Д.С. Зыков, А.С. Балуев, А.Л. Стром, Н.Н. Верзилин, А.А. Лукашов, Ф.А. Романенко и др. Осуществляется датирование сеймонарушений, в ИФЗ РАН они теперь параметризуются в терминах сейсмических явлений ( $\geq$ VIII-IX) и каталогизируются в виде стандартной строки. На примере Мурманской зоны, где удалось проработать, примерно в одинаковой мере, материалы по инструментальному, историческому и доисторическому периодам [4], наглядно демонстрируется не только принципиальная важность использования палеосейсмологического (в понимании авторов) метода оценки долговременной сейсмической опасности, но и абсолютная недостаточность использования в этих целях (применительно к Балтийскому щиту) только данных инструментальных наблюдений и недостаточно проработанного каталога событий исторического периода (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение значений  $M_{max}$  в пределах Мурманского сейсмолинеамента, за разные отрезки времени (по разным группам первичных данных)

Длительность / Период фиксации событий	Максимальная за период фиксированная магнитуда $M_{max}$ / событие
Инструментальный период 1956-2015 гг. / 57 л.	4.3 / 1981 г., устье р. Харловки
Историч. период (поздний) 1750-1955 гг. / 205 л.	(5.8) / 1771 г., Зап. Мурман
Историч. период (ранний) 1500-1754гг. / 250 л.	6.9 / 1503 г., у Рыбачьего п-ова
Доисторический период (палеоземлетрясения) XII в. до н.э. – 1500 г. / 13 тыс.л.	7-7.5 / несколько палеособытий

По интенсивности проявления палеосейсмических, археологических, исторических землетрясений, а также по структурно-кинематическим характеристикам Мурманскую сейсмоактивную зону можно разделить на 3 сектора, в каждом из которых оценена повторяемость событий по величине магнитуд (табл. 2).

Важный, отмечаемый исследователями почти вдоль всего Мурманского побережья и подтверждаемый разными методами факт состоит в том, что вблизи берега (на суше и на прилежащем шельфе), не только гуще и выразительнее сеть линементов (по разломам), но

Повторяемость сейсмических событий в Мурманской зоне

Магнитуды	6	6.5	7
I - западный сектор	700-1000	4000±2000	4000±2000
II - средний сектор	2000	1000	700-1000
III – восточный сектор	2000±1000		

гораздо чаще развиты молодые расщеления и скальные обвалы. Часть вышеописанных, как в скальных породах, так и в рыхлых отложениях, нарушений квалифицируется как палеосейсмодеформации – следы мощных позднеплейстоцен-голоценовых землетрясений.

Ладожский грабен. По более крупным, и лучше изученным сейсмолинеаментам удалось осуществить экспертные оценки повторяемости сильных ( $M \geq 6$ ) событий по градациям магнитуд. Пример по Ладожскому грабену и Карельскому перешейку, как структуре наиболее приближенной к северной столице и особо ответственным объектам, представлен на рисунке 2, а оценки повторяемости сильных событий, по линеаментам – в таблице 3.

Таблица 3

Экспертные оценки повторяемости землетрясений ( $M \geq 6$ ) в Ладожском грабене

$M_{max}$	Сейсмолинементы	M=5.5	M=6.0	M=6.5	M=7
		1 раз в N лет			
7.0- -6.5	Восточно-Ладожский, СЗ Восточно-Ладожский, ЮВ		2000 нет данных	3000 нет данных	5000 10000
6.7	Северо-Ладожский		1000	2500	5000
7.0	Западно-Ладожский		1000	3000	5000
6.4	Вуоксинский	1000	2000	3000	нет данных

Понятно, что без использования палеосейсмологического подхода подобные оценки, даже в виде допущений, получить было невозможно. Разумеется, полученные оценки носят ориентировочный характер, и они вряд ли могут быть использованы в суждениях о текущем сейсмическом режиме [1, 2, 4, 5, 6, 10]. Но именно и только они дают возможность оценивать и значения  $M_{max}$ , и возможные интервалы повторения событий сильных в разные интервалы времени, что необходимо для проектирования объектов особой ответственности. Конкретно по району Ладожского грабена (как и по другим), во-первых, произведено подразделение его на несколько сейсмогенерирующих зон (зон ВОЗ), во-вторых, определяется (до более подробных разработок) значение  $M_{max}$  в каждом и, в-третьих, обнаруживается средняя повторяемость сотрясений с  $M \geq 6$  примерно один раз в тысячу лет (с увеличением интервалов по мере возрастания значений  $M$ ).

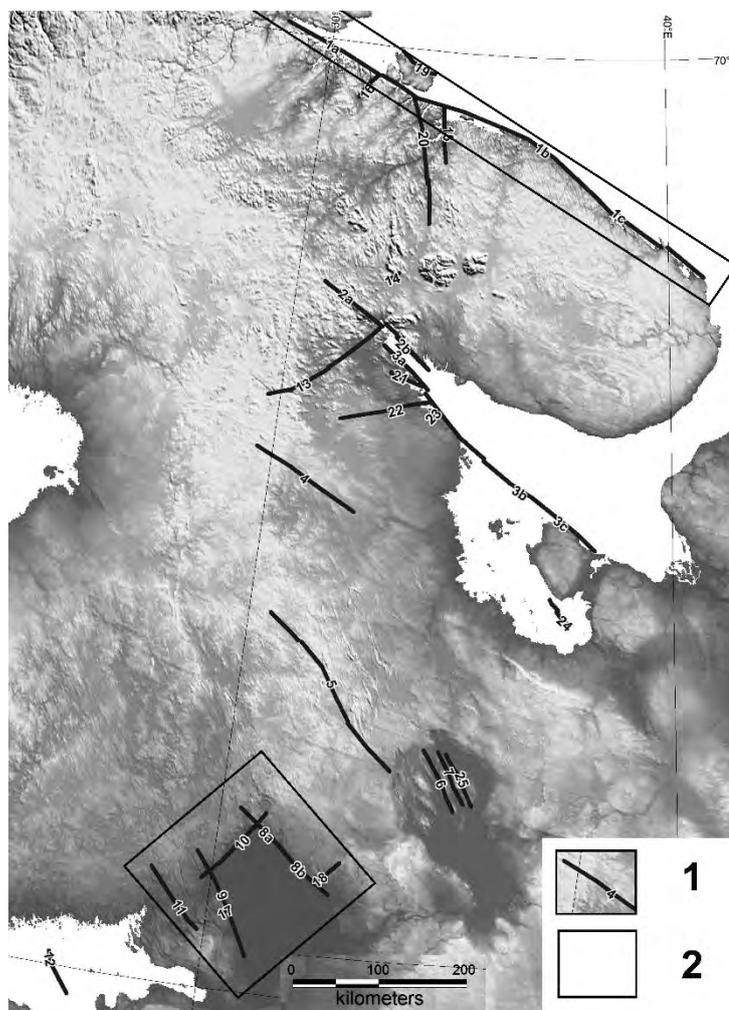


Рис. 2. Карта основных сейсмолинементов восточной части Балтийского щита с установленными землетрясениями,  $M \geq 6$ .

1 – сейсмолинементы; 2 – участки, рассмотренные в тексте как примеры

Принципиальным является то обстоятельство, что вместо прежних, сделанных по короткому ряду наблюдений, определений  $M_{max}=5(5.5)$  в целом для Ладожско-Ботнической зоны, теперь получены значения  $M_{max}=6.5-7$  в масштабе тысячелетий, т.е. на совершенно ином уровне. Экспертные оценки тем же способом осуществлены и для большинства других выделенных сейсмолинементов (табл. 4).

**Некоторые общие результаты.** Несколько позиций выделяются особо. Вместо периода около 400 лет рассмотрением охвачен период до 13-12 тыс. лет. Выделить удалось (по возможностям методов), в основном, события с  $I \geq VIII$  и  $M \geq 6$ , т.е. такие события, которые за последние 400 лет ранее почти не фиксировались. Хотя события обнаруживались по всей территории, в основном они сосредоточиваются в виде полос в зонах с геолого-геоморфологическими признаками активных разломов, т.е. образуют сейсмолинементы.

Параметризация сейсмолинеаментов на российской части Балтийского щита в целях сейсмического районирования [Никонов, июнь, 2014 г.]

№ п/п	№ разлома и сектор	$M_{max}$ в секторе (за 10 тыс. лет)	Возраст опорного события в секторе, исторического – год / палео – тыс. л. н.
1	1А	6.8	1503 /
2	1Б	6.5	/ 2.7±0.5; 8.0±0.5
3	1В	6.0	/ 5.0±3
4	2	6.5	/ 5.0±3
5	3А	6.5	1542 / 1.7±1
6	3Б	6.8	1627 / 3.0±0.3; 8.0±0.5
7	3В	5.8	/ 5.0±3
8	4	6.5	/ 3.0±2
9	5	6.0	/ 7.0±5
10	6	6.0	/ 4.6±0.1
11	7	6.5	/ 8.0±0.5
12	8	6.5	/ 8.0±3
13	9	7.0	/ 3.0±0.1
14	10	6.8	1300 / 2.4±0.2
15	11	7.0	1500±100 / 5.0±0.1; 10.0±1
16	12А	6.0	/ 5.0±2

Таких сейсмолинеаментов (с очагами землетрясений с  $M \geq 6$ ) в российской части Балтийского щита выделено 12. Наиболее крупными и мощными (обеспеченными к настоящему времени исходными данными) являются Мурманский, Кандалакшские, Онежские, Ладожские. Важно, что в каждом сейсмолинеаменте (и/или группе таковых), а на крупнейших – в каждом секторе, установлено по несколько мощных землетрясений прошлого, и в позднеледниковый период, и в голоцене, включая и поздний голоцен, вплоть до поздних 0.5 тыс. лет.

Вместе с другими признаками и в соответствии с зарубежными данными это означает, что движущей силой сейсмогенеза является не только, а в голоцене не столько гляциоизостатическое выравнивание земной коры, но и общерегиональная геодинамика, т.е. тектогенез в «чистом» виде. В южной части региона (Южное Приладожье, окрестности Финского залива) общий уровень сейсмичности (по плотности событий и предельным магнитудам) заметно слабее, здесь события с  $M \geq 6.5$  не выделяются и частота выделенных меньше, но землетрясения с  $I = VII-VIII$  и несколько больше случались.

#### Заключение

На макетах карт ОСР-2012 и ОСР-2014 в пределах Балтийского щита фигурирует только один сейсмолинеамент – Кандалакшский, выделенный на основе единственного сильного исторического землетрясения периода в акватории Белого моря. Одно событие тогда существенно изменило определение сейсмической опасности на Картах ОСР-2012 и ОСР-2014 (в расчете на 500, 1000 лет и более) по сравнению с картой СР-78, где вся территория

## **СЕЙМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ**

Балтийского щита в его российской части была показана, как асейсмичная ( $I \leq V$ ). Если бы переданные в сентябре 2014 г. в Рабочую группу по ОСР-2014 карта с 12 линеаменами, усовершенствованный подкаталог исторического периода и заново составленный каталог по доисторическому периоду были включены в обработку, то Карты ОСР-2014 В, С, D, E, F изменились бы кардинально. Но этого не произошло.

*Авторы признательны Л.Д. Флефель за содействие.*

### **Список литературы**

1. Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления. Под. ред. Н.В. Шарова. Петрозаводск. 2004. 352 с.
2. Мараханов А.В., Романенко Ф.А. Новые данные о послеледниковых сейсмодислокациях Северной Карелии (Карельский берег Белого моря) // Геодинамика и экология Баренц-региона в XXI веке. Матер. Всеросс. конфер. Архангельск. 15-17 сентября 2014. С. 137-140. CD-ROM.
3. Никонов А.А. Фенноскандия – недооцененная сейсмогенерирующая провинция // Геофизика XXI столетия. 2002 год: Сб. трудов IV геофиз. чтений им. В.В. Федынского. М.: Научный мир, 2003. С. 207-214.
4. Никонов А.А., Николаева С.Б. Линеамент Карпинского на границе Фенноскандинавского кристаллического щита и Баренцевой плиты как активная тектоническая и сейсмическая зона // Комплексные исследования природы Шпицбергена и прилегающего шельфа: Матер. Междунар. научной конфер. (Мурманск, 6-8 ноября 2014 г.). Вып. 12. М.: ГЕОС, 2014. С. 232-237.
5. Никонов А.А., Фроль В.В., Шварев С.В. Землетрясения, новейшие разломы и особенности рельефа Беломорского бассейна // Геология морей и океанов. Матер. XX Межд. научной конфер. (школы) по морской геологии. Т. V. М. 2013. С. 204-208.
6. Никонов А.А., Шварев С.В. Землетрясения доисторического периода в системе совершенствования оценок сейсмической опасности (Восточно-Европейская платформа и ее обрамление) // VII Общеросс. конфер. «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в РФ». 15-16 XII 2011 г. М.. С. 224-227.
7. Никонов А.А., Шварев С.В., Сим Л.А., Родкин М.В., Биске Г.С., Маринин А.В. Скальные палеосейсмодеформации на Карельском перешейке (ключевой участок «пещеры Иностранцева», Ленинградская область) // ДАН. 2014. Т. 457. № 5. С. 591–596.
8. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен по 1974 г. Под ред. Н.В. Кондорской и Н.В. Шебалина. М.: Наука, 1977. 586 с.
9. Родкин М.В., Никонов А.А., Шварев С.В. Оценка величин сейсмических воздействий по нарушениям и смещениям в скальных массивах // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2012. V. 3. P. XX1-33XX.
10. Шварев С.В. Структурная позиция, ледниковый и сейсмогенный рельеф г. Воттоваара (Средняя Карелия) // Всеросс. конфер. «VII Щукинские чтения». Геоморфологические ресурсы и геоморфологическая безопасность: от теории к практике. М. 2015. С. 202-205.

УДК 550.34:551.79

**НЕИЗВЕСТНЫЕ ДРЕВНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В АЛАБАШ-КОНУРОЛЕНСКОЙ  
ВНУТРИГОРНОЙ ВПАДИНЕ (ЮЖНОЕ ПРИИССЫККУЛЬЕ, КИРГИЗИЯ)**

**<sup>1,2</sup>Турова И.В., <sup>1,2</sup>Деев Е.В., <sup>3</sup>Корженков А.М., <sup>4</sup>Лужанский Д.В., <sup>5</sup>Гладков А.С.**

<sup>1</sup>*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск 630090, пр-т Академика Коптюга, 3, e-mail: irinka.turova@yandex.ru*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2, e-mail: deeev@ngs.ru*

<sup>3</sup>*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, РАН, Москва, 23242, ул. Б. Грузинская, 10, e-mail: amkor61@yandex.ru*

<sup>4</sup>*Кыргызско-Российский Славянский Университет им. Б. Н. Ельцина, Кыргызстан, Бишкек, 720000, ул. Киевская, 44, e-mail: lujanskiy\_d@mail.ru*

<sup>5</sup>*Институт земной коры СО РАН, Иркутск, 664033, ул. Лермонтова, 128, e-mail: gladkov@crust.irk.ru*

Результаты проведенных палеосейсмологических и археосейсмологических исследований подтвердили надвигание северного борта Алабаш-Конуроленской впадины на ее осадочное выполнение. Впервые в пределах впадины выявлены следы двух древних землетрясений, произошедших в интервале 7300-8400 л.н. и в XVI (?) веке н.э. Параметры сейсмоустапа землетрясения XVI века позволили оценить магнитуду сейсмического события  $M = 7,3 (\pm 0.5)$ . Полученные результаты указывают на необходимость внести поправки в существующую схему сейсмического районирования Республики Кыргызстан, согласно которой на исследуемой территории возможны землетрясения с  $M \leq 6,5$ .

Ключевые слова: древние землетрясения, палеосейсмология, археосейсмология, Алабаш-Конуроленская впадина, Северный Тянь-Шань.

**UNKNOWN ANCIENT EARTHQUAKES IN THE ALABASH-KONUROLENG  
INTERMONTANE DEPRESSION (SOUTHERN ISSYK-KUL LAKE REGION,  
KYRGYZSNAN)**

**<sup>1,2</sup>Turova I.V., <sup>1,2</sup>Deev E.V., <sup>3</sup>Korzhenkov A.M., <sup>4</sup>Lujanskiy D.V., <sup>5</sup>Gladkov A.S.**

<sup>1</sup>*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Koptug ave., 3, e-mail: irinka.turova@yandex.ru*

<sup>2</sup>*Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090 Pirogova str., 2, e-mail: deeev@ngs.ru*

<sup>3</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, the Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242, Bolshaya Gruzinskaya str., 10, e-mail: amkor61@yandex.ru*

## **ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И АРХЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

*4Yeltsin Kyrgyz-Russian Slavic University, Kyrgyzstan, Bishkek, 720000, Kievskay str., 44, e-mail: lujanskiy\_d@mail.ru*

*<sup>5</sup>Institute of the Earth Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 664033, Lermontova str., 128, e-mail: gladkov@crust.irk.ru*

**Results of our paleoseismological and archeoseismological investigations are confirmed an overthrusting of northern flank of the Alabash-Konuroheng depression onto its sedimentary fill. Traces of two ancient earthquakes, occurred during 7300-8400 y BP interval and in XVI (?) century, were revealed in the bounds of the depression for the first time. Parameters of the fault scarp, occurred during an earthquakes of XVI century, have allowed us to assess a magnitude of the seismic event -  $M = 7,3 (\pm 0.5)$ . Obtained results point on necessity to correct an existing Map of the Seismic Zoning of Kyrgyz Republic, which shows possibility of  $M \leq 6,5$  earthquakes in the studied area.**

Keywords: ancient earthquakes, paleoseismology, archaeoseismology, Alabash-Konuroheng intermountain basin, northern Tien Shan.

### **Введение**

Территория Прииссыккуля расположена в пределах северной части Тянь-Шаня, который представляет собой активный внутриконтинентальный ороген и формируется как часть Гималайского горного пояса в результате коллизии Индийской и Евразийской плит. Большинство известных сейсмических катастроф в Прииссыккулье связано с сейсмогенерирующими зонами северного горного обрамления Иссык-Кульской внутригорной впадины.

Наши исследования последних лет позволили выявить в Южном Прииссыккулье неизвестные ранее первичные и вторичные сейсмодислокации, нарушения конструкций археологических памятников, которые указывают на приуроченность к южному горному обрамлению Иссык-Кульской впадины эпицентральных зон сильных (позднечетвертичных, голоценовых и исторических) землетрясений [4, 6]. Цель представляемой работы - выявление следов и возраста древних землетрясений в пределах Алабаш-Конуроленской впадины Южного Прииссыккуля методами палеосейсмологии и археосейсмологии.

### **Структурное положение и современная сейсмичность района исследований**

Алабаш-Конуроленская впадина расположена к югу от оз. Иссык-Куль и вытянута в субширотном направлении на 34 км при ширине до 7,5 км. С юга она ограничена хребтом Терской Ала-Тоо, вершины которого поднимаются выше 4600 м, с севера – серией адырных поднятий (горы Тегерек, Кокон-Адыр, Ак-Бакшы) с высотами до 2500-3000 м. Впадина выполнена среднеплейстоцен-голоценовыми ледниковыми, флювиогляциальными, пролювиальными, аллювиальными, озерно-болотными и эоловыми отложениями [2].

## ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И АРХЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно модели, предложенной в [10], обрамляющие с юга и севера хребты надвигаются на впадину по сопряженным взбросам.

В поле распределения эпицентров инструментально зарегистрированных землетрясений в пределах изученного района фиксируются события, магнитуды которых не превышают 5 [3]. С учетом таких инструментальных данных район исследований на картах сейсмического районирования территории Кыргызской республики расположен в зоне ожидаемых землетрясений с магнитудой  $\leq 6.5$  [8].

### Результаты палеосейсмологических исследований

В северном борту западной части впадины выявлен широтный сейсмоуступ протяженностью 2.3 км и высотой до 4-6 м, который нарушает позднеплейстоцен-голоценовые конуса выноса (Рис. 1). Ниже по склону зафиксированы фрагмент второго сейсмоуступа длиной 350 м.

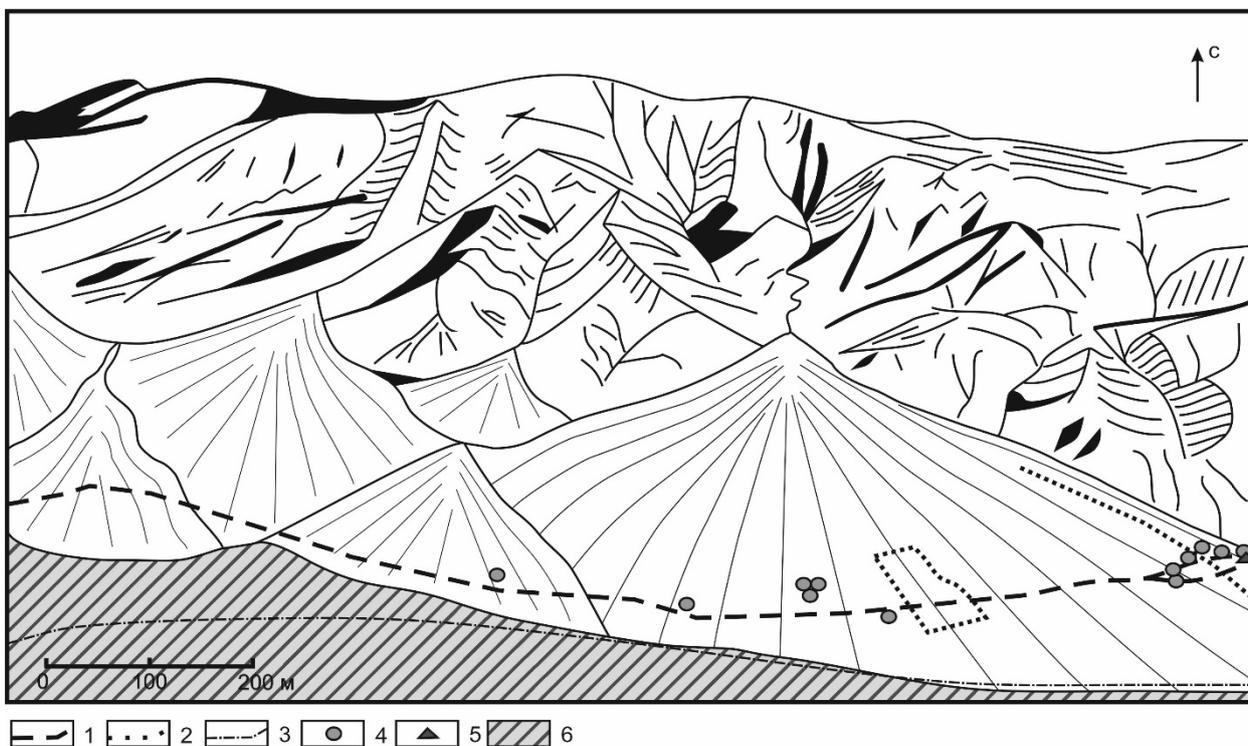


Рис. 1. Проллювиальные конуса выноса, нарушенные широтным сейсмоуступом в северном борту западной части Алабаш-Конуроленской впадины

1 – сейсмоуступ, 2 – каменные стены, 3 – дорога, 4 – деформированные курганы, 5 – положение разреза (Рис. 2), 6 – днище впадины.

В западной стенке сухого сая, прорезающего сейсмоуступы, в месте их сочленения (см. Рис. 1), в точке с координатами (N=42.12703°, E=076.49076°, Alt=2068, точность измерения GPS-координат  $\pm 10$  м) описан разрез, в котором в стратиграфической последовательности вскрыт следующий набор проллювиальных слоев (Рис. 2).

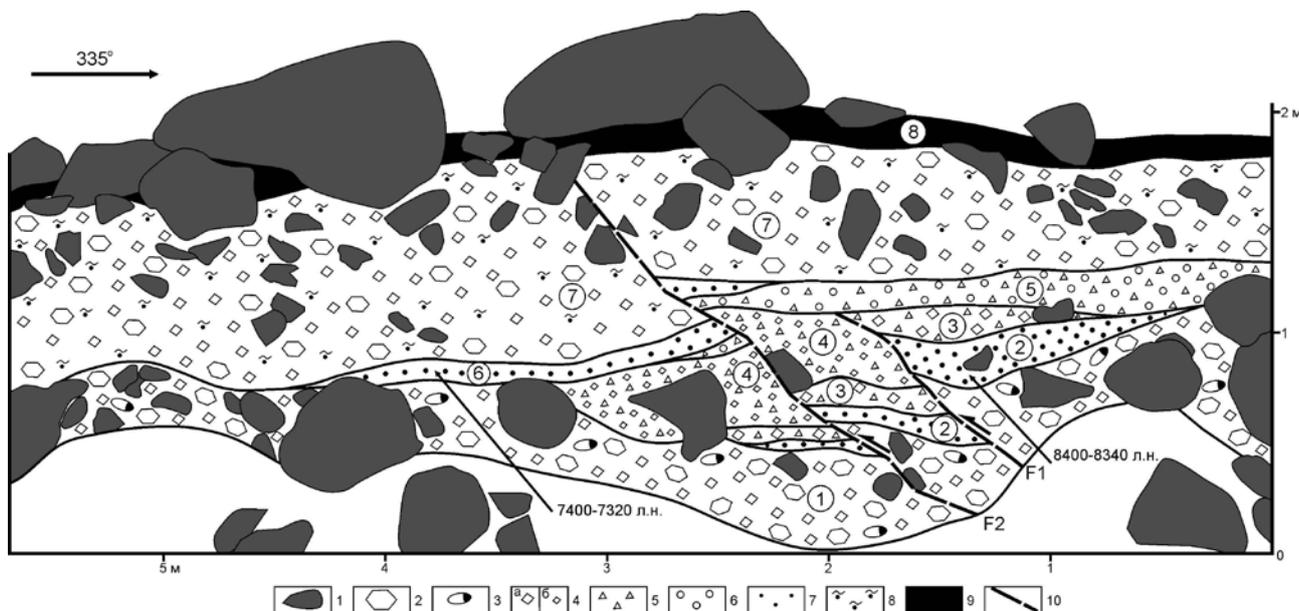


Рис. 2. Разрез западной стенки сухого сая, пересекающего сейсмогенный уступ в северном борту Алабашской впадины

1 – наиболее крупные валуны, отломы и глыбы; 2 – отломы; 3 – валуны; 4 – щебень: а – крупный, б – мелкий; 5 – древеся; 6 – гравий; 7 – песок, 8 – супесь, 9 – современная бедная гумусом горная почва, 10 – разломы.

*Слой 1.* Серый щебне-отломник с отдельными валунами. Мощность более 0.45 м.

*Слой 2.* Линза серого крупно-грубозернистого песка протяженностью около 2.6 м и мощностью до 0.2 м. Из песка отобраны раковины гастропод (образец DEKG-2014-6).  $^{14}\text{C}$  возраст раковин, определенный AMS методом, составил  $7550 \pm 40$  л.н. (Poz-66205), калиброванный возраст - 8400–8340 л.н.

*Слой 3.* Линза серого щебне-дресвяника протяженностью 2.3 м и мощностью до 0.16 м. Щебень преимущественно крупный (> 5 см).

*Слой 4.* Линза серого щебне-дресвяника протяженностью около 1.7 м и мощностью до 0.4 м. Щебень преимущественно мелкий (<5 см).

Залегание слоев 1-4 нарушено разломом F1, имеющим взбросовую кинематику и падающим на север под углом  $40^\circ$ . Амплитуда смещения составляет 0.5 м. Слои 1-4 и нарушающий их взброс срезаются слоями 5-7.

*Слой 5.* Выклинивающаяся к центральной части разреза линза серого гравийно-дресвяника. Мощность до 0.2 м.

*Слой 6.* Линза серого средне-крупнозернистого песка протяженностью 2.4 м и мощностью до 0.1 м. Из песка отобраны раковины гастропод (образец DEKG-2014-5).  $^{14}\text{C}$  возраст раковин, определенный AMS методом, составил  $6465 \pm 35$  л.н. (Poz-66204), калиброванный возраст - 7400–7320 л.н.

*Слой 7.* Крупный щебень с многочисленными отломами и валунами в серовато-белой супеси. Мощность до 0.9 м.

## **ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И АРХЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Залегание слоев 1-7 нарушено разломом F2, имеющим взбросовую кинематику и падающим на север под углом 20-50°. Амплитуда смещения составляет 0.3 м. В результате поднятия северного крыла разлома слой 7 частично эродирован. Слой 7 и нарушающий его целостность взброс F2 перекрываются слоем 8.

*Слой 8.* Современная бедная гумусом горная почва. Мощность до 0.2 м.

Таким образом, в разрезе обнаружены два взброса, соответствующие двум различным палеоземлетрясениям: более древнему – F1 и более молодому – F2. Кинематика смещений указывает на то, что северный борт Алабашской впадины надвигается на ее осадочное выполнение. Возраст землетрясения, сформировавшего подвижку по плоскости F1, находится в диапазоне 7300-8400 тыс. л.н. Второй взброс, с которым связано морфологическое оформление уступов, имеет более молодой возраст. В разрезе он перекрыт только современной почвой. О возрасте землетрясения позволяют судить деформации археологических памятников на поверхности пролювиальных конусов (см. Рис. 1).

### **Исследования сейсмогенных деформаций археологических объектов**

В районе проведения палеосейсмологических исследований расположен ряд археологических объектов. Конструкции этих объектов деформированы, что может быть результатом древних землетрясений.

*Курганный могильник Ала-Баиш* расположен в пределах пролювиального конуса выноса от горного склона до дороги. Внешний вид курганов и погребений позволяет датировать могильник по аналогии с подобными некрополями Кыргызстана сако-усуньским временем, т.е. III в до н.э. – V в. н.э. [1]. Ряд курганов расположен непосредственно на бровке или склоне сейсмоуступа. У них наблюдается сползание вниз по склону уступа каменного материала насыпей, деформации внешних каменных колец курганов.

*Каменные стены.* Нами был зафиксирован четырехугольник из каменных стен с размерами субмеридиональных сторон 210-230 м, субширотных - 110-120 м. Восточнее выделена одиночная стена протяженностью 620 м, ориентированная с юго-востока на северо-запад. Стены сложены из валунов и глыб, приставленных друг к другу вертикально в два ряда.

Субмеридионально ориентированные стены пересекаются основным сейсмогенным уступом. В месте пересечения наблюдаются участки вертикального смещения стен. В восточной протяженной стене при приближении к сейсмоуступу наблюдаются поперечные изгибы, формирование которых может быть связано как с горизонтальными движениями грунта во время землетрясения, так и со смещением вниз поверхности пролювиального конуса при формировании сейсмоуступа. Определенно в пользу воздействия сейсмического удара на стены указывают направленные выбросы камней (на расстояние до 1.5-2 м), находившихся в стенах.

## ***ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И АРХЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ***

Возраст стен может быть указан весьма предположительно. Они могут быть археологическим объектом широкого временного интервала: от культур сако-усуней вплоть до XVIII в. [9]. Некоторую определенность вносят исследования В.М. Плоских [9] корука Туура-Суу, который расположен в пределах Тонской долины. Этот каменный корук возник позднее VIII-XII вв. и, вероятно, относится к позднему средневековью. На каменный корук сверху пристроен глинобитный корук, который существовал, по крайней мере, с первой половины XVIII по XIX век. Следовательно, каменный корук датируется XIII-XVII веками.

### **Обсуждение полученных результатов и выводы**

Результаты проведенных палеосейсмологических и археосейсмологических исследований позволили выделить в пределах северного борта Алабаш-Конуроленской впадины следы двух сильных землетрясений, в виде разломов надвиговой кинематики. Наиболее древнее сейсмическое событие удалось ограничить интервалом возрастов 7300-8400 тыс. л.н. Какое заключение можно сделать о возрасте последнего землетрясения, с которым связано возникновение сейсмоуступов?

Во-первых, датирование могильника Ала-Баш сако-усунским временем указывает на то, что землетрясение заведомо моложе V в. н.э.

Во-вторых, более молодыми археологическими объектами, несущими признаки сейсмогенного разрушения, являются каменные стены. Их возраст по аналогии с аналогичными объектами Тонской долины может быть принят в интервале XIII-XVII веков.

В-третьих, существующие литературные и архивные материалы по археологии Иссык-Кульской впадины указывают на два периода заселения городов в котловине: X-XII и XIII-XV вв. н.э. В XVII в. здесь проходят калмыки, а с XVIII в. начинается современная киргизская история заселения этого края. «Немым» остается лишь XVI в. Ни до, ни после этого времени в исторической литературе по исследованному региону информации о сильных землетрясениях не встречается. Можно предположить, что сильное землетрясение (или их серия) в XVI в. способствовали угасанию земледельческой цивилизации Прииссыккулья, нарушив политическую, административную и военную структуру региона, что позволило племенам калмыков пройти, практически не встречая серьезного сопротивления местных жителей.

В-четвертых, полученные в последние годы данные археосейсмологических исследований в Северном и Южном Прииссыккулье свидетельствуют именно в пользу такой датировки. Обнаружены свидетельства разрушения средневековых крепостей и внезапного опускания средневековых городищ северного побережья под воды Иссык-Куля, которые могут быть датированы XVI веком [5, 6].

## **ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И АРХЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Наконец, параметры основного сейсмоуступа позволяют рассчитать возможную магнитуду землетрясения. С использованием зависимостей, приведенных в [7], магнитуда землетрясения могла составлять 7,3 ( $\pm 0.5$ ). Согласно шкале MSK-64 интенсивность (I) землетрясения при такой магнитуде могла составлять 8-10 баллов.

Полученные результаты указывают на необходимость ввести поправки в существующую схему сейсмического районирования Республики Кыргызстан, согласно которой на исследуемой территории возможны землетрясения лишь с  $M \leq 6,5$ . Актуальность проведенных работ определяется тем, что вблизи от района исследования находится Каджисайское хранилище радиоактивных отходов, разрушение которого может привести к экологической катастрофе.

### **Список литературы**

1. Винник Д.Ф. Археологические памятники Иссык-Кульской котловины // Известия Киргизского географического общества. – Фрунзе, 1975. – № 12.
2. Геологическая карта СССР. Масштаб 1:200 000. Серия Северо-Тянь-Шаньская. К-43-XVII. Министерство геологии СССР. – Ленинград: Картфабрика ВАГТ. – 1968.
3. Кальметьева З.А., Миколайчук А.В., Молдобеков Б.Д., Мелешко А.В., Жантаев М.М., Зубович А.В. Атлас Землетрясений Кыргызстана. – Бишкек: ЦАИИЗ, 2009. – 73 с.
4. Корженков А.М., Абдиева С.В., Мажейка Й., Муралиев А.М., Фортуна А.Б., Чаримов Т.А., Юдахин А.С. О неизвестных сильных голоценовых землетрясениях на юге Иссык-Кульской котловины, Тянь-Шань // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2014. Т. 41, № 2. – С. 30-40.
5. Корженков А.М., Деев Е.В., Лужанский Д.В., Абдиева С.В., Агатова А.Р., Мажейка Й., Меньшиков М., Рогожин Е.А., Родина С.Н., Родкин М.В., Фортуна А.Б., Чаримов Т.А., Шен Д., Юдахин А.С. О неизвестном сильном землетрясении Северного Прииссыккуля в позднем средневековье по данным археосейсмологических исследований // Физика Земли. – 2015а. (в печати).
6. Корженков А.М., Кольченко В., Лужанский Д., Абдиева С.В., Деев Е.В., Мажейка Й.В., Рогожин Е.А., Родина С.В., Родкин М.В., Фортуна А.Б., Чаримов Т.А., Юдахин А.С. Археосейсмологические исследования и структурная позиция средневековых землетрясений на юге Иссык-Кульской впадины (Тянь-Шань) // Физика Земли. – 2015б. (в печати).
7. Никонов А.А. Развитие палеосейсмогеологического метода для оценки сейсмической опасности Средней Азии // Геолого-геофизическое изучение сейсмоопасных зон. – Фрунзе: Илим, 1984. – С. 192-203.
8. Оценка вероятной сейсмической опасности территории Кыргызстана на период 10 лет и 50 лет (2012–2021 и 2012–2061 гг.). Составление новой карты сейсмического районирования территории Кыргызской Республики в масштабе 1:1 000 000: Заключительный отчет / Рук. НИР К.Е. Абдрахматов. Бишкек, 2011. – 239 с. (Фонды Института сейсмологии НАН Кыргызской Республики).
9. Плоских В.М. Киргизский корук Туура-Суу / П.Н. Кожемяко, Д.Ф. Винник (ред.) Археологические памятники Прииссыккуля. – Фрунзе: Илим, 1975. – С. 145–159.
10. Burgette R.J. Uplift in response to tectonic convergence: The Kyrgyz Tien Shan and Cascadia subduction zone: Ph.D. Thesis. – University of Oregon, USA. 2008. – 242 p.

УДК 550.34+551.24 (571.53/55)

## **СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДИНАМИКА ПРИБАЙКАЛЬЯ**

**Чипизубов А.В.**

*Институт земной коры СО РАН, Иркутск, 664033, ул. Лермонтова, 128, e-mail: chipizub@crust.irk.ru*

Рассматриваются различные данные, свидетельствующие о геодинамическом режиме региона. Показано, что сеймотектонические деформации в зонах основных активных разломов при палеоземлетрясениях и Муйском землетрясении 1957 г. характеризуются разрывными структурами сжатия. Наличие складчатости и взбросовых разрывов в отложениях Байкальской и Баргузинской впадин подтверждает существование геодинамического режима сжатия. Дается объяснение, противоречащих этому, косвенным данным по механизму очагов землетрясений и по GPS-геодезии. Делается вывод о том, что современная геодинамика Прибайкалья отражает существующий геодинамический режим сжатия.

Ключевые слова: кинематика сеймотектонических разрывов, активные разломы, геодинамический режим.

## **MODERN GEODYNAMICS OF THE BAIKAL REGION**

**Chipizubov A.V.**

*<sup>5</sup>Institute of the Earth Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 664033, Lermontova str., 128*

Various evidence of geodynamic regime in the region. It is shown that seismotectonic deformation in key areas of active faults in the palaeoearthquakes and Muya earthquake in 1957 are characterized by ruptures compression structures. The presence of folding and revers ruptures in the sediments of the Baikal and Barguzin basins confirms the existence of geodynamic compression mode. Explains, contrary to this, indirect data on earthquake focal mechanisms and GPS-geodesy. The conclusion is that the reflects existing geodynamic compression mode.

Keywords: kinematics seismotectonics ruptures, active faults, geodynamic mode.

### **Введение**

До настоящего времени абсолютное большинство исследователей рассматривают Байкальскую систему впадин как рифтовую зону, несмотря на прямые геологические свидетельства о разрывных структурах сжатия плиоцен-четвертичного возраста, выявленные В.В. Ружичем в 70–80-ых годах прошлого века. Более того, палеосейсмологическими исследованиями с применением тренчинга, начиная с 1991 г., стали выявляться голоценовые сеймотектонические деформации взбросового, надвигового и взбросо-сдвигового типов.

## ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И АРХЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Такие деформации выявлены А.В. Чипизубовым и О.П. Смекалиным, С.Г. Аржанниковым и А.В. Аржанниковой [8, 9 и др.] в зонах Окино-Жомболокского, Главного Саянского, Тункинского, Обручевского, Приморского, Северобайкальского, Баргузинского и, возможно, Кичерского разломов. Тем не менее, и сейчас ситуация существенно не меняется, что свидетельствует о необходимости объективного анализа противоречивых данных.

В настоящих материалах будут рассмотрены все виды данных, хоть как-то указывающих на геодинамический режим Прибайкалья.

### Кинематика активных разломов Прибайкалья по данным палеосейсмологии

Наиболее отчетливые и однозначные данные о взбросо-сдвиговом характере деформаций по Тункинскому разлому вскрыты траншеей в районе горы Белый камень. Траншея ЗТ-2 (Рис. 1) была пройдена в тальвеге суходола, блокированного обратным (подгорное крыло надвинуто на нагорное) уступом, который и в настоящее время имеет заметное выражение. На сдвиговую компоненту смещения указывают резкие изменения мощностей гумусированных горизонтов и песчано-суглинистых слоев на противоположных крыльях разрывов и даже примыкание к ним различных отложений.

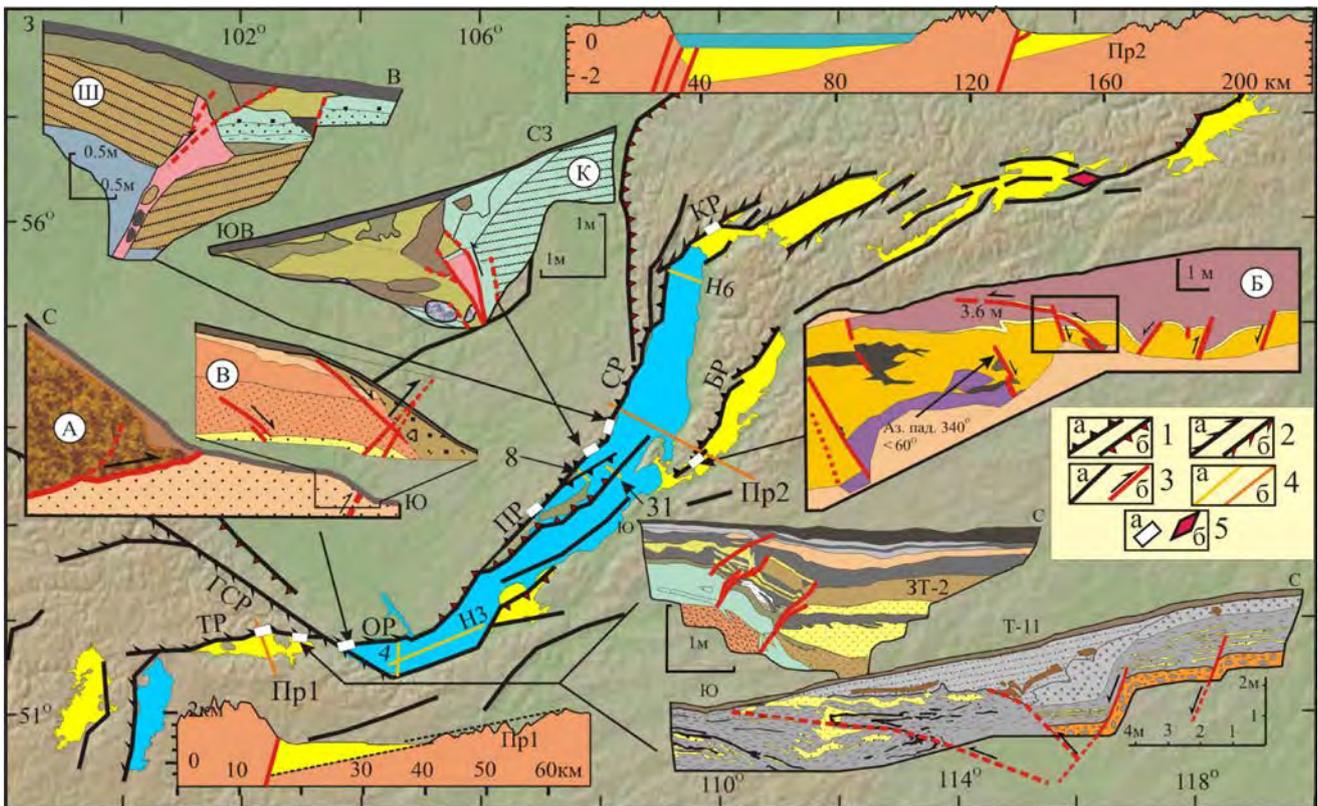


Рис. 1. Основные активные разломы Прибайкалья и разрезы стенок зачисток, траншей и карьеров

1 – взбросы и сдвиго-взбросы установленные (а) и предполагаемые (б); 2 – взбросо-сдвиги установленные (а) и предполагаемые (б); 3 – разломы неустановленной кинематики (а) и сместители на разрезах (б); 4 – профили НСП (а) и гипсометрические с батиометрией (б); 5 – местоположение разрезов (а) и эпицентральной зоны Муйского землетрясения 1957 г. (б); Разломы: BR – Баргузинский; GCP – Главный Саянский; KP – Кичерский; OP – Обручевский; PR – Приморский; CP – Северобайкальский; TP – Тункинский.

## *ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И АРХЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ*

В разрезах 10 траншей по Торской ПСД, вскрывших сеймотектонический уступ, морфологически выраженный как сброс, только в двух (Т-7 и Т-11) отчетливо проявляются разрывные смещения сбросового характера. Однако пологость сместителей и их извилистость не исключают гравитационного генезиса данных смещений. Лежащая складка в левой части разреза Т-11 (врезка на Рис. 1), считавшаяся ранее солифлюкционной, скорее всего, является надвиговой структурой, поскольку невозможно допустить течение грунтов по горизонтальной поверхности (верхний гумусированный горизонт) или даже в подъем (нижний гумусированный горизонт). Сбросы в этом случае представляются чисто приповерхностными компенсационными разрывами.

Обручевский разлом, ограничивающий впадину Байкала с северо-запада, рассматривался ранее всеми исследователями (в том числе и автором) как сброс. При проведении детальных работ в конце августа 2009 г. на его субширотном отрезке в месте сочленения с Главным Саянским взбросо-сдвигом были обнаружены надвиг и взбросовые уступы. Эти разрывные структуры сжатия были установлены в небольших карьерах (врезки А и В на Рис. 1).

Видимая амплитуда надвига коренных пород (аз. пад. 20-40°, угол пад. 15-20°) на террасовый комплекс составляет порядка 30 м. В 25 м ниже от выхода надвига на поверхность прослеживается уступ высотой около 5 м. Наглядное представление о разрывных структурах, образовавших и осложняющих подобный уступ высотой порядка 5 м, дает разрез на врезке В к рисунку 1. В разрезе отчетливо проявляются оползневые смещения (листрические сбросы) гравитационные сбросы, возникшие при смещении взброшенного крыла, а также псевдосбросы с падением сместителя в склон. Последние разрывные структуры являются уступообразующими. С учетом левосдвиговой составляющей смещения и местоположения в левом (восточном) склоне конуса выноса они могут быть только взбросо-сдвиговыми сместителями.

По Северобайкальской зоне ПСД в малоамплитудных сеймотектонических уступах были вскрыты взбросо-надвиговые сместители с падением на запад (290-300°) под углом 60-45° (врезка Ш на Рис. 1) и взбросовые сместители с падением на северо-запад (325-340°) под углом 60-78° (врезка К, Рис. 1) на Кочериковском мысе [9]. О взбросовой природе палеосейсмодислокаций свидетельствует их дугообразность в плане в соответствии с рельефом на различных масштабных уровнях.

По зоне Баргузинского разлома в придорожном карьере у селения Сухая расчисткой вскрылись разрывы надвигового, взбросового и сбросового типов (врезка Б на Рис. 1), которые сформировались в условиях режима сжатия. Вполне вероятно, у основания макроуступа Улюнской кулисы это взбросы, а у предгорных ступеней, вдающихся во впадину (форбергов?)

## ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И АРХЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

– надвиги. Взбросо-надвиговый тип разрывных нарушений можно распространять, как минимум, на всю Улюнскую кулису и, как максимум, на весь Баргузинский разлом.

До недавнего времени оставался возможным вариант, что Приморский разлом может быть листрическим сбросом. Однако прямые и косвенные данные, полученные при исследованиях последних лет, указывают на правые сдвиги-взбросовые подвижки по зоне рассматриваемого разлома в позднем кайнозое [8]. На фотографии (Рис. 2) отчетливо видно надвигание коренных образований на пролювиальные отложения по взбросо-надвиговому (угол падения  $50^\circ$ ) сместителю, падающему на северо-запад.

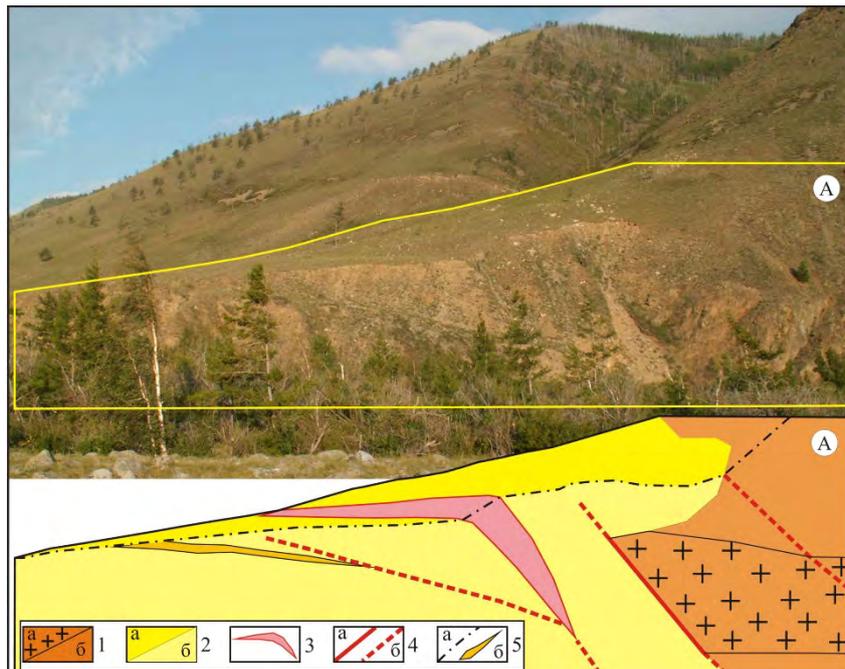


Рис. 2. Фотография правого обрывистого борта долины Сармы в месте, где выходят сейсмотектонические смещения, и разрез обрыва

1 – обнажения коренных пород (тектониты по нижнепротерозойским гнейсам) в субвертикальной стенке обрыва (а) и они же на крутом склоне слегка перекрытые склоновыми образованиями; 2 – рыхлые делювиально-пролювиальные отложения на пологой наклонной поверхности конуса выноса временного водотока (а) и в субвертикальной стенке обрыва (б); 3 – сейсмотектонический уступ; 4 – сместители разрывов выделенные уверенно (а) и предполагаемые (б); 5 – верхняя граница крутой стенки обрыва (а) и задранная терраса (б).

Теперь даже листрическая кинематика Приморского разлома, ранее вполне допустимая, не подтверждается, и основной структурный линеамент (разлом Обручева) Байкальской «рифтовой» зоны для всех его составляющих систем (кулис) характеризуется сейсмогенными разрывами формировавшихся в условиях сжатия (надвиги, взбросы сдвиги-взбросы и взбросо-сдвиги). Соответственно, не может быть и речи о существовании рифтовой зоны. Впадины, а тем более таковые выраженные в виде односторонних грабенов (Пр1 и Пр2 на Рис. 1), могут и формируются в условиях сжатия.

**Сейсмодислокации Муйского землетрясения 1957 г. ( $M_S=7,6$ ;  $M_B=7,5$ )**

При Муйском землетрясении 1957 года в эпицентральной зоне (отмечена на Рис. 1) сформировались сейсмотектонические дислокации, которые интерпретируются левыми и взбросо-сдвигами и сбросо-сдвигами, хотя имеются неопровержимые доказательства правосдвиговых смещений и возникновения самостоятельных валов сжатия и складок [1]. По мнению В.П. Солоненко хребет Удокан надвинулся под углом  $70^\circ$  на Намаракитскую впадину и сдвинулся к северо-востоку [1], что свидетельствует о левом взбросо-сдвиге и предполагает рамповую природу Намаракитской впадины. Р.А. Курушина и др. [3] считают, что осредненным результатом сейсмотектонических движений при Муйском землетрясении был левосторонний сдвиг-сброс, отмечая при этом такое объяснение непростым. Неоднозначность интерпретации типа сейсмотектонических движений подвигло автора внимательнее отнестись к опубликованным материалам по обследованию этого землетрясения.

На схемах сейсмодислокаций [1] имеется 5 мест с указанием направления и амплитуды сдвига, причем только в двух случаях имеются надежные реперы. В одном из них правым сдвигом смещен на 1,05 м корень дерева по основному субширотному разрыву, а в другом левым сдвигом смещена тропа на 1 м по поперечному оперяющему разрыву. Поскольку при обследовании эпицентральной области сейсмотектонические уступы не вскрывались, сейчас уже трудно отдать предпочтение сбросовому или взбросовому их генезису. Однако на схемах сейсмодислокаций даже уступы, показанные как сбросовые (опущено подгорное крыло), на самом деле являются взбросовыми (асимметричные валы, осложненные разрывами), один из которых блокировал ручей с образованием озера.

Наиболее достоверные данные и их объективная интерпретация указывают на то, что сейсмотектонические движения по основным разрывам обусловлены правым сдвиго-взбросом.

**Характер деформаций в отложениях впадин по геофизическим данным**

По данным сейсмического профилирования, проведенного многими научными организациями в 1981–1992 гг., взбросовые разрывы проявляются и в отложениях впадины Байкала. В интерпретации К.Г. Леви и др. [10] взбросы выделяются на профилях №Н3 и №Н6 (Рис. 3, местоположение профилей на Рис. 1). Зундукский разлом на профиле №8 [7] представляет собой взброс со взброшенным юго-восточным крылом.

На профиле Н6 два разрыва в его центральной части являются типичными взбросами, хотя в первоисточнике [10] направления смещений для них ошибочно указаны как для сбросов. Сброс с падением в склон на этом же профиле у его СЗ окончания в действительности может быть взбросом при условии правосдвиговых смещений и прохождения профиля к югу от конуса выноса р. Тья. На профиле Н3, проходящем по простирацию Южно-Байкальской впадины выделяются [10] поперечные сбросы в ее днище и взбросы в ее бортовых частях.

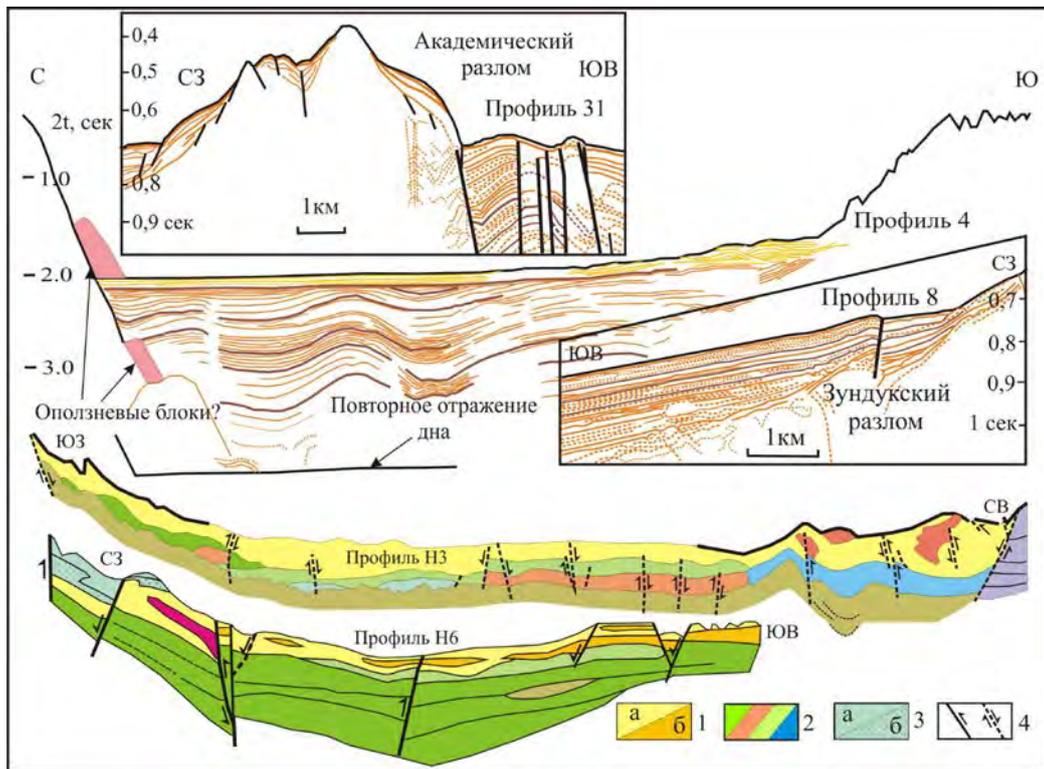


Рис. 3. Профили НСП и их интерпретация (8 и 31) по [7], (4, НЗ и Н6) по [10] с небольшими изменениями

По вертикальной оси время двойного пробега волн. 1 – современные и позднплейстоцен-голоценовые пески (а) и глины (б); 2 – отложения от среднего Плейстоцена до раннего Плиоцена; 3 – переработанные отложения верхней последовательности (а) и отложения дельт и конусов выноса (б); 4 – активные разрывы достоверные (а) и предполагаемые (б).

При приближении к дельте Селенги отчетливо проявляется складкообразование. В зоне Академического разлома серия субвертикальных сместителей, большей частью сбросового типа, осложняет складчатость в отложениях вплоть до голоцена (профиль № 31). При этом крутизна складок с глубиной увеличивается. Все это свидетельствует о том, что данные разрывы являются элементами структуры сжатия. Даже в Южнобайкальской впадине, где должно сказываться растяжение, обусловленное значительными (11-15 км) левыми взбросо-сдвиговыми смещениями по Главному Саянскому разлому, на профиле №4 отчетливо проявляются довольно крутые складки. По крайней мере, 10% сокращение наиболее древних слоев отложений поперек впадины не только компенсирует косое растяжение, но и превышает его. Наличие взбросов и складчатости, определенно не локальной (присдвиговой), в отложениях впадины Байкала, может свидетельствовать только о режиме сжатия.

В отложениях Баргузинской впадины по данным сейсморазведки на основе отраженных волн (ОГТ) помимо сбросовых разрывов проявляются и взбросовые с амплитудой до 100 м [5]. При другой интерпретации временных разрезов некоторые из сбросов могут перейти даже во

## ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И АРХЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

взбросы, как самый СЗ разрыв вблизи Шаманского отрога. Более того, могут быть выделены и надвиги.

Таким образом, прямые данные по палеосейсмологии и четвертичной геологии свидетельствуют, что впадины байкальского типа формировались и продолжают формироваться сейчас в условиях сжатия и, соответственно, не являются рифтовыми. Образование Байкальской системы впадин (рампы или односторонние рампы) обусловлено сжатием, вероятно, от Индо-Азиатской коллизии и Тихоокеанской субдукции. При этом на юго-западном фланге этой системы впадин превалирует влияние коллизии, а на северо-восточном фланге большее воздействие оказывает субдукция (Рис. 4). Исходя из этого, на северо-восточном фланге Байкальской зоны должны проявляться правые взбросо-сдвиги.

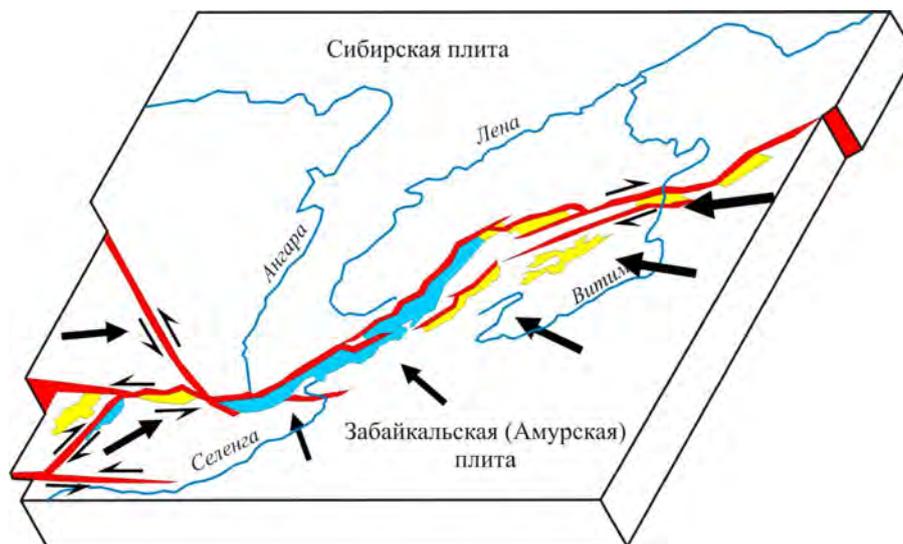


Рис. 4. Предполагаемая геодинамическая модель для территории Прибайкалья

### Обсуждение полученных результатов

В настоящее время прямым данным о существовании геодинамического режима сжатия противоречат косвенные данные по механизму очагов землетрясений и по GPS-геодезии, указывающие на режим растяжения. Такие обстоятельства требуют объяснения причин противоречивости косвенных данных. О невозможности надежного определения механизма очагов землетрясений, основанного на неестественных и недоказанных допущениях, указывалось автором ранее. Относительно землетрясений Прибайкалья, можно сказать, что при изменении полярности сейсмоприемников, механизм абсолютного большинства очагов станет взбросовым и взбросо-сдвиговым. Противоречивость данных GPS-геодезии у различных исследователей, а также по сетям наблюдений с короткой и длинной базой [4, 6 и др.] делает получаемые результаты сомнительными. Еще больше увеличивает сомнения регистрация суперинтенсивных (до 5-7 см в год) движений, особенно в асейсмичных областях, зачастую превосходящих таковые в сейсмоактивных зонах [2]. Данное обстоятельство может указывать

## **ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И АРХЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

на то, что измеряются не тектонические движения, а как считает Ю.О. Кузьмин [2], движения земной поверхности, вызванные крайне малыми воздействиями природного или техногенного генезиса. Что касается Прибайкалья, то измеряемые скорости движения ( $10^{-8}$  в год) на два порядка меньше (0,5–1 мм/год) даже точности определения координат пунктов GPS-наблюдений [6].

### **Выводы**

Поскольку косвенные данные по механизму очагов землетрясений и по GPS-геодезии являются малодостоверными, прямые данные становятся безальтернативными и свидетельствуют о том, что современная геодинамика Прибайкалья определяется геодинамическим режимом сжатия.

### **Список литературы**

1. Живая тектоника, вулканы и сейсмичность Станового Нагорья. Солоненко В.П., Тресков А.А., Курушин Р.А. и др. - М.: Наука, 1966. - 231 с.
2. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломов: активность, опасность, механизм формирования // Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия. Т.1. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. – С. 66–68.
3. Курушин Р.А., Мельникова В.И., Гилева Н.А. Муйское землетрясение 27 июня 1957 г. (Сейсмологические и сейсмологические данные) // Проблемы современной сейсмологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии (Мат-лы Всероссийского совещания с международным участием). Т.1. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007, С. 193-202.
4. Лухнев А.В, Саньков В.А., Мирошниченко А.И., и др. Современные деформации земной коры Центральной части Байкальского рифта по данным GPS геодезии // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе. Т.1. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. – С. 92–94.
5. Лыкова В.В. Сейсмические исследования методом ОГТ при изучении разломно-блокового строения южной части Баргузинской впадины // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе. Т.1. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. – С. 159–161.
6. Тимофеев В.Ю. Скорости деформаций и сильные землетрясения Северного Тянь-Шаня и Байкальского региона // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе. Т.1. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. – С. 118–121.
7. Хлыстов О.М., Мац В.Д., Воробьева С.С. и др. Строение и развитие подводного Академического хребта // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41, №6. – С. 819–824.
8. Чипизубов А.В., Смекалин О.П., Имаев В.С. Палеосейсмодислокации и палеоземлетрясения зоны Приморского разлома (оз. Байкал) // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2015. – Т. 42, № 2. – С. 63–77.
9. Чипизубов А.В., Смекалин О.П., Семенов Р.М., Имаев В.С. Палеосейсмичность Прибайкалья // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2009. – Т. 36, № 1. – С. 7–22.
10. Levi K.G., Miroshnichenko A.I., Sankov V.A. et al. Active faults of the Baikal depression // Bull. Centre Rthc Elf E[plor.-Prod., Elf Aqvitaine. 1997. V. 21(2). P. 399–434.

УДК: 550.343.4+550.348.64

**НОВЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА И  
СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАВКАЗА (ПО  
АРХЕОСЕЙСМИЧЕСКИМ МАТЕРИАЛАМ)**

**Никонов А.А.**

*Институт физики Земли РАН, Москва, ул. Б. Грузинская, 10, e-mail: nikonov@ifz.ru*

На протяжении более полувека в протяженной полосе Кавказского побережья Черного моря от г. Анапы до г. Сухуми в каталогах не отражались землетрясения с  $M \geq 5.7$  и на картах СР, соответственно, район не относился к опасным, хотя публикации о сильных землетрясениях прошлого появлялись неоднократно. Автор предпринял обобщение прежних данных и привлек новый массив данных о сильных землетрясениях, устанавливаемых с помощью археосейсмического метода. В результате на Кавказском побережье выделено 9-10 очаговых зон землетрясений с  $I \geq VIII-IX$  баллов за период в несколько тысяч лет. Эта разработка требует переоценки устоявшихся определений сейсмического потенциала, сейсмической опасности и рисков в весьма ответственном регионе.

Ключевые слова: Кавказ, Кавказское побережье, Черное море, землетрясения, очаговые зоны, сейсмогенерирующие зоны (сейсмолинеаменты), сейсмический потенциал, сейсмическая опасность, археосейсмический метод, сейсмическое районирование.

**MODERN APPROACH TO SEISMIC POTENTIAL AND SEISMIC DANGER  
EVALUATION FOR THE BLACK SEA CAUCASIAN SHORE AREA  
(BY ARCHAEOSEISMOLOGICAL DATA)**

**Nikonov A.A.**

*Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Bol. Gruzinskaia str. 10, e-mail: nikonov@ifz.ru*

In course of more than a half of century all the Black Sea Caucasian shore area, between towns Anapa and Sukhumi believed to be non-danger one in seismic respect. Neither basic catalogues nor official maps of seismic zoning didn't content any data on earthquakes with  $M \geq 5.7$ , in spite of appearance currently some proper publications with serious arguments for reality of these events in the past. The author put in practice archaeoseismic approach to reveal and give some parametric characteristics of past strong seismic events within the area in the period of several thousand years. Nine to ten source areas with  $I \geq VIII-IX$  had been singled out along and in crest of the shore area. This estimation has to be resulted in revision of adopted currently evaluations of seismic potential, seismic danger and risks in the area of particular importance and responsibility.

Key words: Caucasus, Caucasian shore, Black sea, earthquakes, source areas, seismogenic zones (seismolineaments), seismic potential, seismic danger, archaeoseismic method, seismic zoning.

## **Введение**

Прибрежная полоса Черноморского побережья Кавказа заслуживает особого внимания ввиду плотной заселенности и высокой экономической и транспортной значимости, с одной стороны, и скудости сведений о разрушительных землетрясениях в ней в период инструментальных наблюдений, как и в исторический – с другой. Самыми сильными из известных за последние столетия событий стали землетрясения Анапское 1966 г. с  $M=5.8\pm 0.1$  и 1870 г. с  $M=6$  [6]. Оба этих события не могут считаться достаточными для определения сейсмического потенциала побережья в долговременном аспекте, даже только на Российском его участке.

К началу наших исследований, и практически до настоящего времени, официальные каталоги включают всего 7 землетрясений («с древнейших времен») на Кавказском побережье с  $5.1 \leq M \leq 6$  [7]. Из них 3 располагаются в Анапской зоне, 2 близ г. Сочи и 2 у г. Сухуми. Ни одного события с  $M > 6$  в каталогах не содержится. Примечательно, что в опубликованном Международным сейсмологическим центром (ISC) в 2007 г. обновленном каталоге сильных землетрясений Средиземноморья на Кавказском побережье Черного моря помещено всего два события с  $M \geq 6$  в Анапской зоне и одно вблизи г. Сухуми, землетрясений с  $M \geq 7$  в этом руководящем каталоге вообще нет. На таких базах делаются оценки сейсмической опасности, в том числе в виде карт ОСР и ДСР для периодов  $\geq 1$  тыс. лет.

### **Цель исследования**

Если при оценке сейсмической опасности ставить во главу угла определение  $M_{max}$  в масштабе тысячелетий, то необходимо помимо сведений о событиях исторического времени (столетия) и доисторического времени (тысячелетия) использовать два подхода – археосейсмический и палеосейсмогеологический. Они требуют многолетних полевых работ на археологических раскопах совместно с археологами. В таковых, как правило, сейсмологи не участвуют и эту сторону исследований не контролируют.

### **Археосейсмический подход**

Понимая, что сведения о землетрясениях за период инструментальных наблюдений, или даже за 100-200 лет, совершенно недостаточны для обоснованных суждений, как о тектоническом (сеймотектоническом) развитии территории (акватории), так и для надежной оценки сейсмической опасности, автор использовал археосейсмический подход. На Западном Кавказе он впервые применен в 1985 г, а затем совершенствовался в пространственно-геометрической модификации. Методологические основы сформулированы в [3 и др.]. На Кавказском побережье от г. Сухуми на юго-востоке до г. Анапа на северо-западе обследовались основные архитектурные и археологические памятники, и сохранившиеся, и руинированные. Стационарные исследования совместно с археологами на их раскопах

## **ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И АРХЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

удалось тогда осуществить в районе г. Сухуми, а затем и г. Анапы. Практически на всех обследованных и изучавшихся подробнее памятниках обнаружены и зафиксированы явные признаки разрушений и повреждений именно сейсмического характера [2, 4 и др.]. С помощью археологов и соответствующей литературы удалось, с той или иной степенью приближения, определить время (временные интервалы) возникновения сейсмических нарушений и/или последовавшего восстановления, древних сооружений [10]. Способом обратных засечек выделено несколько подводных очаговых областей, вытянутых вдоль побережья, преимущественно в его юго-восточной части, где они датированы VII, XI, XVIII вв. и  $I_0$  для них оценено в VIII-IX и IX баллов. Несколько разрушительных событий идентифицировано в Анапской поперечно зоне. В каталог автора только в Анапской зоне период около 2.5 тыс. лет включено 4 новых события с  $M \geq 6$  и несколько событий известных прежде получили более надежные и высокие оценки магнитуд, а всего на побережье таковых выявлено 9-10.

Теперь, в дополнение, автор попытался использовать еще один, специфический тип древних сооружений, ранее остававшийся без внимания специалистов сейсмологов. Это мегалитические сооружения бронзового века – дольмены. Материалы по ним опубликованы в достаточно полном и представительном виде [1], что позволяет (на первом этапе) выполнять оценки камерально. На этом пути в рассматриваемом регионе благоприятны для оценок сейсмических воздействий (преимущества подхода перед другими и наряду с другими) следующие особенности указанного типа сооружений.

1. Распространение мощных каменных сооружений, одинаковых в общем конструкции и габитуса, вдоль всего Кавказского побережья Черноморья.
2. Достаточно определенный возрастной интервал сооружений 4.5-3.5 тыс. лет.
3. Возможность использовать не одиночные сооружения, но их группы на каждом участке и вдоль самого побережья, и (местами) уже на кавказских склонах.
4. Возможность оценивать именно (часто исключительно) сильнейшие события ( $I \geq VIII \div IX +$  баллов).
5. При детальном рассмотрении опубликованных в подробности материалов определять направление главного сейсмического удара.

### **Новые материалы**

В регионе выделены и вкратце охарактеризованы несколько вполне выразительных с точки зрения факторов и силы воздействий черт (типов) повреждений и деформаций дольменов. Повреждения и нарушения в большинстве случаев (а их сотни) обнаруживаются на каждом отдельном дольмене и в группах близких памятников. Они могут затрагивать, как отдельные составные элементы (пол, боковые стены, кровлю), так и по несколько на каждом сооружении. В отдельных случаях они таковы, что привели к почти полному коллапсу

## ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И АРХЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

постройки, но чаще нарушают отдельные элементы или один из элементов сооружения. Отдельные нарушения выражаются в раскалывании единичной плиты или нескольких в разных частях памятника. Иногда фрагментированные элементы остаются почти на своем месте, только расщеляясь, но чаще они отодвинуты и/или отброшены в сторону, нередко за пределы постройки, т.е. на величину до 2-3 м по горизонтали. Никаким экзогенными воздействиями названные признаки не объясняются, не могут они быть приписаны и человеческой деятельности. Воздействия сейсмические.

По указанным признакам удастся градуировать нарушения по силе внешнего воздействия в пределах от VII-VIII, до IX баллов. Наиболее выразительны и информативны два случая раскалывания построек (частей их) вместе с подстилающим скальным основанием, на котором они возведены. Здесь воздействия интенсивностью IX баллов сомнений вызвать не могут. Эти пункты – Солоники (Рис. 1, пункт 3, № 1) и Солох-аул на юго-востоке (Рис. 1, пункт 4, № 3). Подробные характеристики здесь даны быть не могут. Практически отсутствуют нарушения в группе дольменов у с. Адербиевка, к юго-востоку от г. Новороссийск, что не дает оснований допускать здесь сотрясения с  $I > VIII$  баллов за время существования дольменов. Такое заключение по участку подтверждается характером нарушений менее крупных и более молодого возраста дольменов вблизи г. Геленджик.

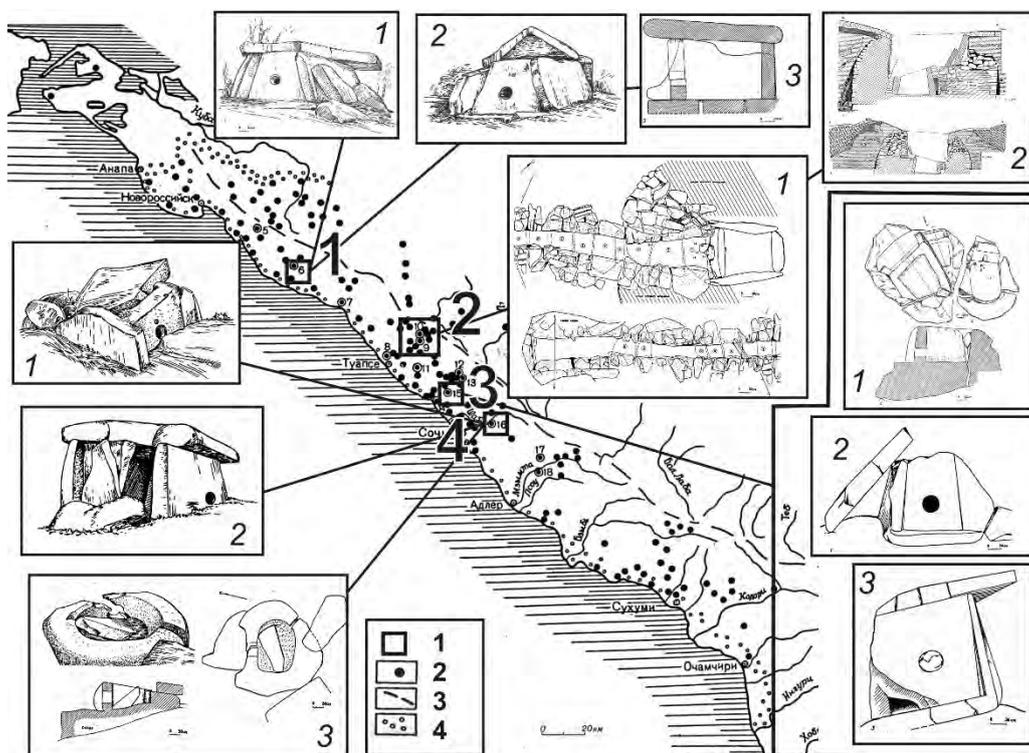


Рис. 1. Карта местонахождения дольменов на Западном Кавказе [1] с выделением участков наиболее поврежденных и разрушенных конструкций (по автору)

1 – участки (группы) с наиболее сильными повреждениями: 1 – Пшада, 2 – Анастасиевка, 3 – Солоники, 4 – Солох-аул (на выносной экспликации изображены конкретные структуры с условными номерами каждой); 2 – местонахождение дольменов; 3 – главный Кавказский хребет; 4 – граница леса

**ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И АРХЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Новые разработки позволяют, помимо выделявшихся автором прежде по археосейсмическим данным очаговых областей с I<sub>0</sub>-IX, наметить еще несколько таковых в прибрежной полосе за более длительный период, примерно за 4 тыс. лет. С северо-запада на юго-восток таковых обнаружено четыре, в окрестностях р. Пшада и к северу и к югу от г. Сочи (Рис. 1, пункты 1 – Пшада, 2 – Анастасиевка, 3 – Солоники, 4 – Солох-аул). Первая из них, вероятно, ориентирована вдоль основных геологических структур и побережья. Еще одна новая очаговая область с продольной ориентацией в относительной близости к г. Туапсе, скорее всего, должна соотноситься с (при)осевой зоной Главного Кавказского хребта. Две поперечные области вблизи г. Сочи, располагаются к юго-востоку. Такое простираие неудивительно после того, как Сочинское землетрясение 1870 г. по уточненным и дополненным макросейсмическим данным оказалось имеющим M=6 и поперечную к берегу длинную ось макросейсмического поля [6] (Рис. 2).

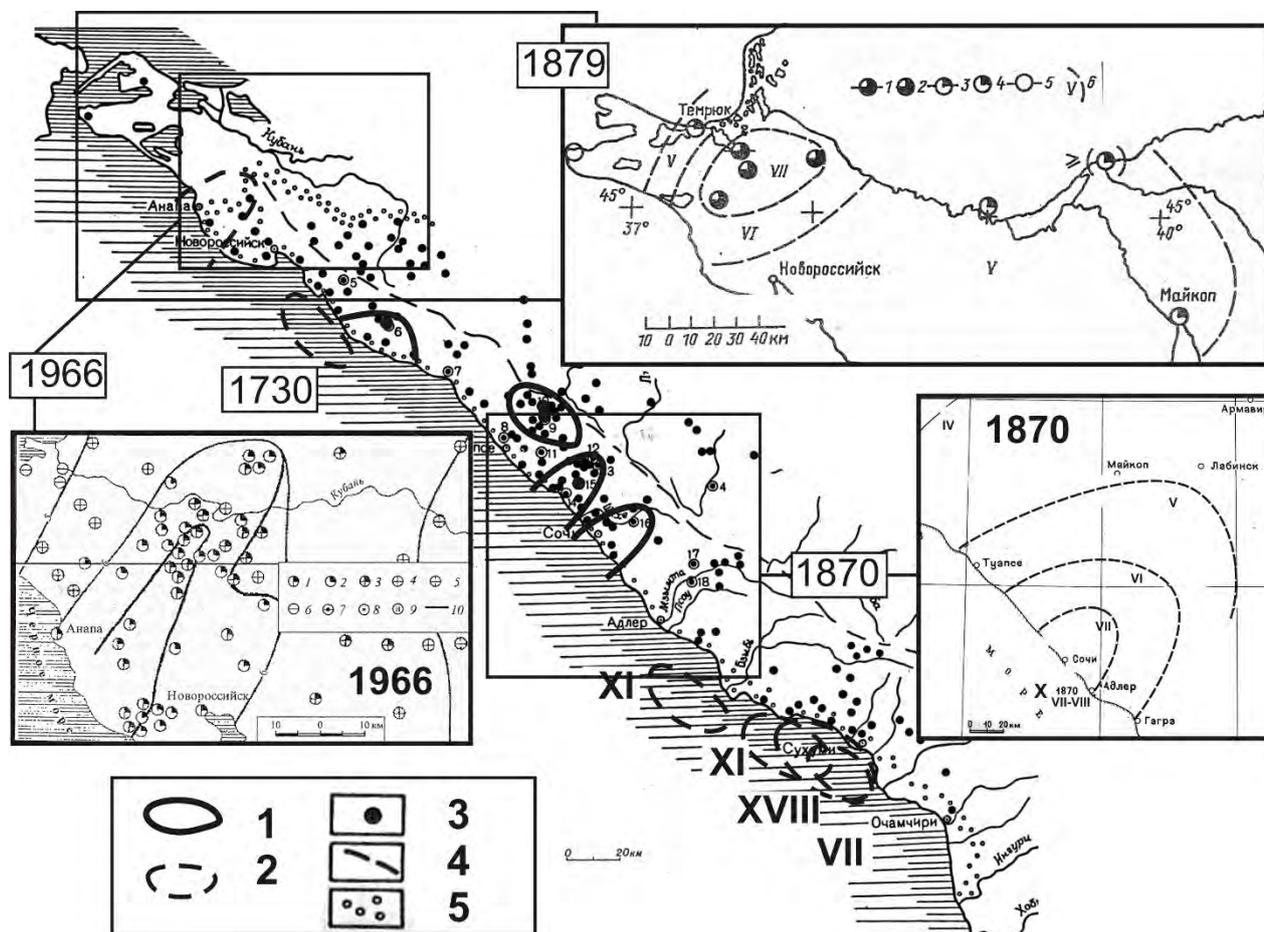


Рис. 2. Карта очаговых зон сильных землетрясений на Кавказском побережье Черного моря, выявленных с помощью археосейсмического метода (римскими цифрами обозначен век землетрясения, арабскими – год)

1 – области, выявленные в 80-х годах XX века по деформациям на архитектурных памятниках побережья [10]; 2 – области, выявленные автором в 2015 году по повреждениям и разрушениям дольменов (на выносной экспликации даны исходные макросейсмические данные и макросейсмическое поле исторических землетрясений 1870, 1879 и 1966 гг. по ранним публикациям автора). 3 – местонахождение дольменов; 4 – главный Кавказский хребет; 5 – граница леса.

## ***ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И АРХЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ***

В 80-е годы прошлого века, когда автором были намечены подводные очаговые области сильных землетрясений в юго-восточной части Кавказского побережья, представительных материалов по тектонике береговой полосы и взморья не существовало. Теперь, после получения более полной и представительной картины распределения во всем регионе очаговых областей сильных землетрясений в последние 3-5 тыс. лет, такая возможность появилась. При сравнении двух независимо полученных групп данных, а именно, о зонах разломов, продольных и поперечных, и о позиции очаговых областей сильных, т.е. с относительно глубокими гипоцентрами, землетрясений, отчетливо выявляется следующее. Все пять выделенных автором продольно, т.е. с северо-запада на юго-восток ориентированные, очаговые зоны попадают на зоны взбросо-надвигов первого порядка. Все три поперечного простирания поперечные очаговые зоны совпадают с разломными зонами антикавказского протяжения, выявленными на суше, но, по всей вероятности, продолжающимися и к материковому склону. Две из продольных очаговых зон (Геленджикская и Туапсинская) располагаются, как оказалось, на пересечении крупных разломов, продольных и поперечных, т.е. в тектонических узлах. Отсюда выводится достаточно определенная (в рассматриваемом масштабе) структурно-тектоническая предопределенность и геодинамическая обусловленность возникновения крупнейших очаговых зон, и, соответственно, характер и уровень их динамического проявления. Таким образом, появляются необходимые и достаточные основания для оценок, как сейсмического потенциала, так и сейсмической опасности в долговременном аспекте, включая и их картографическое отображение на государственных картах.

### **Обсуждение**

До сих пор материалы и результаты археосейсмических исследований остаются вне внимания сейсмологов, хотя свидетельствуют о том, что Кавказское побережье Черноморья в последние столетия и тысячелетия многократно подвергалось разрушительным землетрясениям с  $M \geq 6$ . В этой ситуации естественно сопоставить полученный блок данных о сильных сейсмических проявлениях в прибрежной полосе Кавказского побережья с картами сейсмического районирования последнего поколения. Обратим внимание соответствующие новейшие публикации двух групп высококвалифицированных исследователей.

Первая группа, как это отчетливо видно по картам в [9, Рис. 1, 5, 7, 10] и как следует из текста публикации, использовала каталог издания 1977 г. [7]. На всем Черноморском побережье не оказалось ни одного события с  $M \geq 5.7$ , да и те только в Анапской зоне. Соответственно, на схеме с сейсмическими линеаментами вдоль побережья выделены и рассматриваются только те, что генерируют землетрясения с  $M = 6.0 \pm 0.2$  [10, Рис. 2]. Поэтому, в отличие от ряда других районов Сев. Кавказа, Черноморское побережье фактически

## **ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И АРХЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

оказалось не включенным в число сейсмически опасных районов Кавказа. На изданной МСССС и ИФЗ в 1983 г. Карте сейсмического районирования СССР в м-бе 1:5 млн. все Кавказское побережье отнесено к VII-балльной зоне. На макете карты ОСР-14-В для периода повторяемости 1000 лет все Черноморское побережье Кавказа, даже Анапская очаговая область, показаны как зона с I=VIII баллов.

Другая группа исследователей представила версию детального сейсмического районирования Сев. Кавказа [9]. Среди основ предпринятой ими работы авторы выделяют «детальное изучение сейсмичности», а также «целесообразность использовать как можно более полный каталог землетрясений». Итогом работ, по их сообщению, «являются схемы эпицентров сильных и слабых представительных сейсмических событий» (там же, стр. 38). На рисунке 1, «Эпицентры землетрясений Сев. Кавказа и сопредельных территорий по инструментальным и историческим данным с древнейших времен по 2012 г. ( $M \geq 3.3$ )» на протяжении Кавказского побережья, от г. Новороссийск до г. Гудаута, в прибрежной зоне обозначены три эпицентра событий с  $5 \leq M \leq 6$ , т.е. нет ни одного IX-балльного. На рисунке 3 «Карта зон ВОЗ Сев. Кавказа с указанием их сейсмического потенциала ( $M_{max}$ )» выделена лишь одна вдольбереговая зона с умеренно высоким потенциалом на всем указанном, свыше 300 км, протяжении прибрежной полосы нет ни одной зоны высшего ранга и ни одной поперечной зоны.

### **Заключение**

Ясно, что учет опубликованных с 1988 г. материалов [2, 4, 5, 10 и др.] привел бы к иным оценкам и сейсмического потенциала, и сейсмической опасности, а карты СР на всю прибрежную, первостепенного жизненного и хозяйственного значения полосу для периодов  $>100$  лет выглядели бы совершенно иначе.

Выводимые оценки сейсмического потенциала и опасности региона неизбежно ведут к переоценке общих рисков, поскольку установление сильных землетрясений в регионе ввиду его специфического положения неотвратимо влечет за собой необходимость учета сопровождающих разрушительных процессов на суше и в море в виде разрывов, крупных оползней и цунами. Речь к тому же идет не только о курортной зоне общероссийского значения (с детской здравницей), но и об объектах значимости особой, таких как Новороссийский порт, газонефтяные трубопроводы, терминалы, недублируемые транспортные пути и коммуникации, Международный олимпийский объект в Сочи и др.

Автор признателен Л.Д. Флейфель и Л. Е. Борисовой за техническую помощь.

### **Список литературы**

1. Марковин В.И. Дольменные памятники Прикубанья и Причерноморья. М. 1997. 404 с.

## ***ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И АРХЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ***

2. Никонов А.А. Гибель античных городов Диоскурия и Севастополис в Колхиде как результат сейсмических воздействий // *Геоэкология*. 1997. №4. С. 111-122; №6, С. 121-126.
3. Никонов А.А. К методологии археосейсмических исследований памятников прошлого // *Вопросы инженерной сейсмологии*. М.: Наука, 1990. Вып. 31. С. 137-142.
4. Никонов А.А. Об исторических землетрясениях и сейсмическом потенциале района г. Анапы // *Сейсмологический бюллетень Украины за 1993 г. Симферополь*. 1996. С. 84-87.
5. Никонов А.А. Сейсмический потенциал Крымского региона: сопоставление региональных карт и параметров выявленных событий // *Физика Земли*. 2000. № 7. С. 53-62.
6. Никонов А.А. Сильнейшее из зарегистрированных в районе Большого Сочи землетрясение 1870 г. – новые оценки параметров // *3-я Росс. Конфер. по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию*. Сочи, 1999 г.: Тезисы докладов. М. 1999. С. 27.
7. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен по 1974 г. Под ред. Н.В. Кондорской и Н.В. Шебалина. М.: Наука, 1977. 536 с.
8. Рогожин Е.А., Лутиков А.И., Овсяченко А.Н., Донцова Г.Ю., Родина С.Н., Кучай М.С. Опыт детального сейсмического районирования Северного Кавказа // *Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений*. 2013. № 4. С. 38-42.
9. Уломов В.И., Данилова Т.И., Медведева Н.С., Полякова Т.П., Шумилина Л.С. К оценке сейсмической опасности на Северном Кавказе // *Физика Земли*. 2007. № 7. С. 31-45.
10. Nikonov A.A. Unknown catastrophic earthquakes on the Eastern Black Sea coast: an experience in archaeoseismic reconstructions // *Proc. Symp. Europ. Seismol. Commiss. XXI General Assembly, 23-27 August 1988, Sofia, Bulgaria*. Sofia, 1989. P. 101-111.

УДК 551.248.2 + 550.34 (235.222)

## СЛЕДЫ ДРЕВНИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЯЛОМАНСКОМ ГРАБЕНЕ (ГОРНЫЙ АЛТАЙ)

<sup>1,2</sup>Лобова Е.Ю., <sup>1,2</sup>Деев Е.В., <sup>2,3</sup>Зольников И.Д.

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск 630090, пр-т Академика Коптюга, 3, e-mail: [katenageologist@mail.ru](mailto:katenageologist@mail.ru)

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2, e-mail: [deev@ngs.ru](mailto:deev@ngs.ru)

<sup>3</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, 630090, пр-т Академика Коптюга, 3, e-mail: [sole@igm.nsc.ru](mailto:sole@igm.nsc.ru)

Проведены палеосейсмологические исследования в пределах Яломанского грабена (Горный Алтай). В нижнем течении р. Малый Яломан и р. Иня выявлено шесть разрезов четвертичных отложений с присутствующими в них сейсмогенными деформациями (сейсмитами). Следы древних землетрясений сконцентрированы на двух возрастных уровнях: (1) позднплейстоценовый, (2) голоценовый. Следы крупного голоценового землетрясения на одном стратиграфическом уровне прослежены на расстоянии 7 км. В качестве механизмов образования сейсмита следует рассматривать хрупкое разрушение, разжижение и флюидизацию. Типы сейсмогенных деформаций и их размеры позволяют утверждать, что в пределах Яломанского грабена и его горного обрамления в доисторическое время существовала зона концентрации землетрясений с  $M \geq 5-7$ , хотя в настоящее время здесь происходят землетрясения с более низкими магнитудами.

Ключевые слова: сейсмита, землетрясения, четвертичные отложения, Яломанский грабен, Горный Алтай

## ANCIENT EARTHQUAKES TRACES IN THE YALOMAN GRABEN (GORNYY ALTAI)

<sup>1,2</sup>Lobova E.Y., <sup>1,2</sup>Deev E.V., <sup>2,3</sup>Zolnikov I.D.

<sup>1</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Koptug ave., 3, e-mail: [katenageologist@mail.ru](mailto:katenageologist@mail.ru)

<sup>2</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090, Pirogova str., 2, e-mail: [deev@ngs.ru](mailto:deev@ngs.ru)

<sup>3</sup>Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Koptug ave., 3, e-mail: [zol@igm.nsc.ru](mailto:zol@igm.nsc.ru)

Paleoseismology researches within the Yalomán graben (Gornyy Altai) are conducted. Six sections of Quaternary deposits with the earthquake-induced deformations (seismites) which are present at them are revealed in the lower current of the rivers Malyy Yalomán and Inya. Large ancient earthquakes traces are concentrated at two age levels: (1) Late Pleistocene, (2) Holocene. Traces of a large Holocene earthquake are tracked at distance

## **ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И АРХЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

of 7 km at one stratigraphic level. As the mechanisms of seismites formation it should be considered brittle destruction, liquefaction and fluidization. Types of seismites and their sizes suggest that within Yalomansk graben and its mountain frame existed concentration zone of earthquakes with  $M \geq 5-7$  in prehistoric times, although at present there are earthquakes with lower magnitudes.

Keywords: seismites, earthquakes, Quaternary deposits, Yaloman graben, Gorny Altai

### **Введение**

Горный Алтай – классическая территория неотектонического горообразования. Очевидно, что процессы орогенеза сопровождались здесь сейсмическими событиями. В самом Горном Алтае и в прилегающих районах Кузбасса, Монгольского и Рудного Алтая сильные землетрясения в исторический и инструментальный периоды наблюдений случались неоднократно. Интерес к палеосейсмологическим исследованиям в Горном Алтае возобновился после Чуйского землетрясения 2003 г. с  $M_s=7.3$  и интенсивностью 8-9 баллов. Были получены новые данные о голоценовых первичных и вторичных сейсмодислокациях территории [7], обнаружены вторичные сейсмогенные деформации (сейсмнты) в более древних четвертичных отложениях [2, 3, 4].

Актуальность палеосейсмологических исследований продиктована необходимостью оценки сейсмического потенциала различных районов Горного Алтая в связи с бурно идущим здесь возведением объектов туристической инфраструктуры, существующими планами по строительству малых ГЭС, а также с возможной прокладкой по его территории газопровода в КНР. В первую очередь в этом отношении интересны территории межгорных впадин, к категории которых относится и Яломанская впадина, находящаяся в пределах одноименного грабена (Рис. 1).

Цель представляемой работы – выявление следов плейстоцен-голоценовых землетрясений в районе Яломанского грабена.

### **Структурное положение и современная сейсмичность района исследований**

Яломанский грабен дренируется р. Катунь, а по оперяющим его разломам заложены долины крупных ее притоков – рр. Чуя, Большой и Малый Яломан, Иня. Формирование грабена в четвертичном периоде предопределялось развитием протяженной субмеридионально ориентированной структуры - Катунского раздвиг. Он относится к числу активных структур, с которой связаны инструментально и исторически зафиксированные землетрясения. Непосредственно в Яломанском грабене и его горном обрамлении за инструментальный период наблюдений регистрировались относительно слабые землетрясения до 9-го энергетического класса.

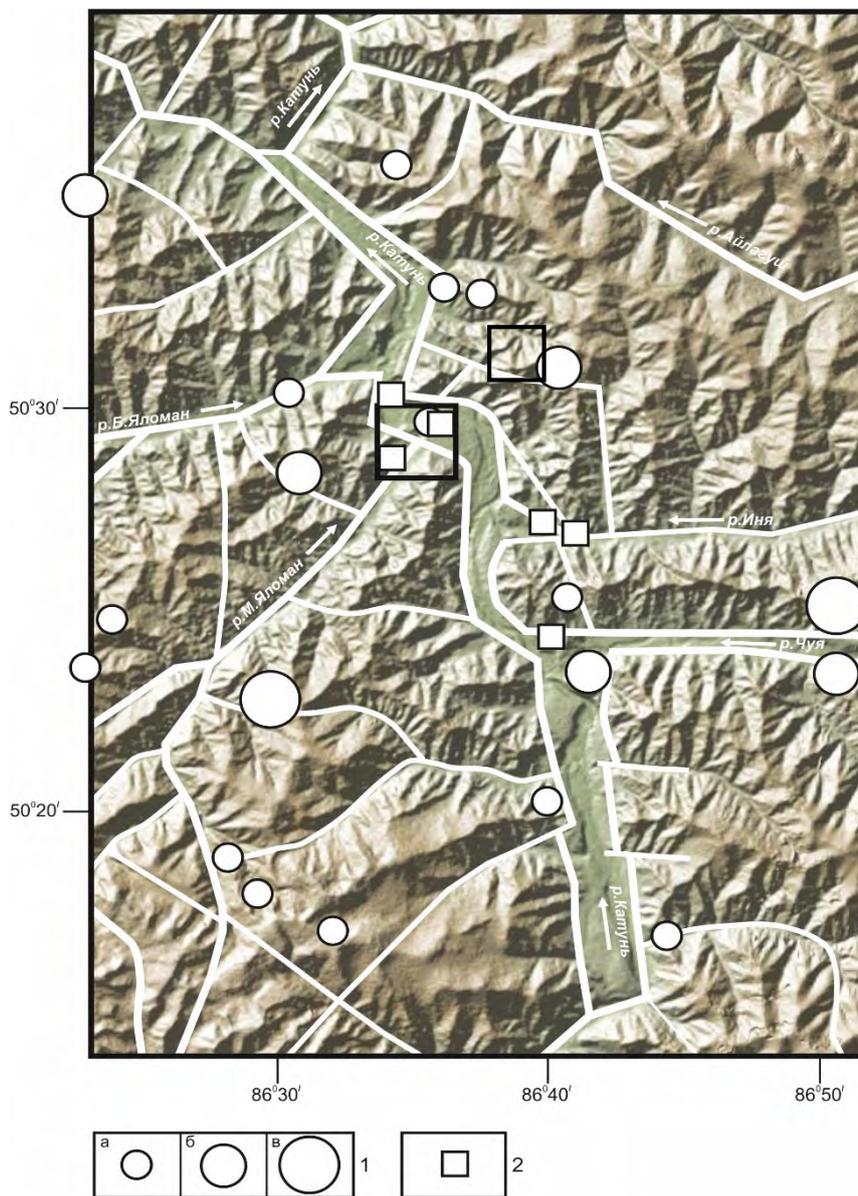


Рис. 1. Современная блоковая структура района Яломанского грабена

Белые линии – выраженные в рельефе разноранговые разломы. Черные четырехугольники – районы работ. 1 - эпицентры инструментально зарегистрированных землетрясений за период с 1963 по 2009 г. (по данным Алтае-Саянского филиала Геофизической службы СО РАН): а –  $K=6-7$ , б –  $K=8$ , в –  $K=9$ ; 2 – положение ранее выявленных разрывов с сейсмогенными деформациями в четвертичных отложениях.

Грабен выполнен мощным комплексом среднеплейстоцен-голоценовых отложений. Здесь сосредоточены опорные разрезы отложений среднеплейстоценовой ининской и позднеплейстоценовой сальджарской толщ. Обе толщи сложены циклитами отложений гигантских гляциальных паводков (ГПП). Фациальная архитектура циклитов, количество которых в ининской толще может достигать семи, а в сальджарской – трех, схожа, и в разрезе полного цикла выделяется следующий набор фаций: селевая, пойменная, русловая, оплывневая, вторично-подпрудных озер [5]. При этом мощность ининской толщи может достигать 300 м, сальджарской – 60 м.

## **ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И АРХЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Плейстоценовые отложения перекрываются позднеплейстоцен-голоценовым субаэральным комплексом, включающим лессы и эоловые пески, делювиально-пролювиальные шлейфы. В них вложен голоценовый аллювий, формирующий низкие террасы и поймы.

### **Результаты палеосейсмологических исследований**

При изучении разрезов четвертичных отложений в нижнем течении р. Малый Яломан и р. Иня обнаружено шесть обнажений с разнотипными и разновозрастными деформационными структурами, которые авторы соотносят с доисторическими землетрясениями.

Все выявленные деформации относятся к категории вторичных косейсмических. В качестве механизмов их образования следует рассматривать хрупкое разрушение, разжижение и флюидизацию. Хрупкие деформации представлены трещинами, структурами растяжения, микроразломами и разломами различной кинематики. Амплитуды смещений по микроразломам и разломам составляет первые миллиметры – первые десятки сантиметров. С процессом разжижения связано формирование флексур, циклоидных и лежащих складок, псевдонодулей в отложениях с размерностью 0.1-1 см, а также крупномасштабных структур перемешивания (с амплитудами до 2-3 м) при участии аллювиальных галечников. При этом можно различать три самостоятельные системы во влагонасыщенных отложениях, где происходит разжижение: (1) система коллектор – флюидоупор; (2) система без флюидоупора, но с наличием неустойчивости в виде обратного градиента плотности (более грубозернистые слои подстилаются мелкозернистыми); (3) внутрислоевые сдвиговые деформации разжиженного осадка.

С учетом мирового опыта исследования сейсмиков авторы используют следующие критерии соотнесения обнаруженных деформаций с доисторическими землетрясениями:

1. Изученные разрезы расположены в области интенсивного позднекайнозойского горообразования. Изученная территория характеризуется наличием многочисленных разномасштабных неотектонических разломов, в том числе сейсмогенерирующих.

2. Деформации не являются седиментационными, т.к. они нарушают первичные седиментационные текстуры и первичную стратиграфическую последовательность слоев.

3. Деформации не могут быть сопоставлены с гляциодислокациями, т.к. изученные разрезы расположены в перигляциальной зоне. Они отличаются от деформаций, вызванных мерзлотными процессами (текстуры солифлюкционного перемешивания и мерзлотные клинья), оползневыми процессами.

4. Деформации спонтанно развиты в однотипных сочетаниях слоев и слойков. Часто деформированные горизонты разделены недеформированными интервалами разреза.

## *ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И АРХЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ*

5. Деформации, расположенные на одном стратиграфическом уровне, в ряде случаев могут быть прослежены на расстоянии от сотен метров до первых километров, что может свидетельствовать об их широкой площадной распространенности.

6. Обнаруженные деформации масштабно и морфологически соответствуют деформациям, зафиксированным в других сейсмоактивных зонах и генетически сопоставленным с современными, историческими и древними землетрясениями.

В возрастном отношении концентрация выявленных сейсмогенных деформаций приходится на завершающий этап формирования сальджарской толщи (разрезы Малояломанский, Малояломанский-1, 2, Яломанский) и на растянутый во времени этап (до 10500 л.н.) врезания в нее Катуня и Малого Яломана с формированием комплекса средних террас. Здесь сейсмогенные деформации отмечены в озерных отложениях, в отложениях пойменной фации ГТП и нижней части аллювия. Второй возрастной уровень концентрации сейсмогенных деформаций моложе 10500 л.н. (разрезы Малояломанский-2, 3, Малоинской). Они произошли после того, как долины Малого Яломана и Ини были заполнены мощной толщей делювия, сформировавшейся за счет переотложения рыхлых сальджарской и ининской толщ. Сверху деформации закрываются аллювием низких террас, делювием и современной почвой (Рис. 2). О верхней возрастной границе последнего наиболее сильного землетрясения говорит радиоуглеродная датировка, полученная из погребенной почвы, залегающей над голоценовым аллювием в районе разрезов Малояломанский-2 и 3 -  $9715 \pm 65$  лет (СОАН-2621) [8]. С учетом местоположения разрезов Малояломанский-2, 3 и Малоинской следы этого крупного древнего землетрясения на одном стратиграфическом уровне удалось проследить на расстоянии 7 км. Причем, интенсивность деформаций увеличивается с востока (долина р. Иня) на запад (долина р. Малый Яломан), т.е. в сторону древней эпицентральной зоны.

Понимание механизмов формирования сейсмиков позволяет с их помощью оценить вероятные параметры доисторических землетрясений. В международных (INQUA, MSK-64, EMS-98) и региональных шкалах оценки интенсивности землетрясений, построенных с учетом проявления вторичных косейсмических деформаций в рыхлых грунтах, величина нижнего порога возникновения хрупких деформаций и эффектов разжижения варьирует от 5 до 8 баллов [6; и др.].

Статистические данные, увязывающие магнитуды исторических и инструментально зарегистрированных землетрясений с эпицентральными расстояниями до сайтов с проявлением явлений разжижения и флюидизации в различных сейсмоактивных регионах, показывают, что они проявляются в рыхлых влагонасыщенных осадках при землетрясениях с  $M \geq 5.0-6.0$  [10]. В отложениях гравийно-галечной размерности нижний предел магнитуд может

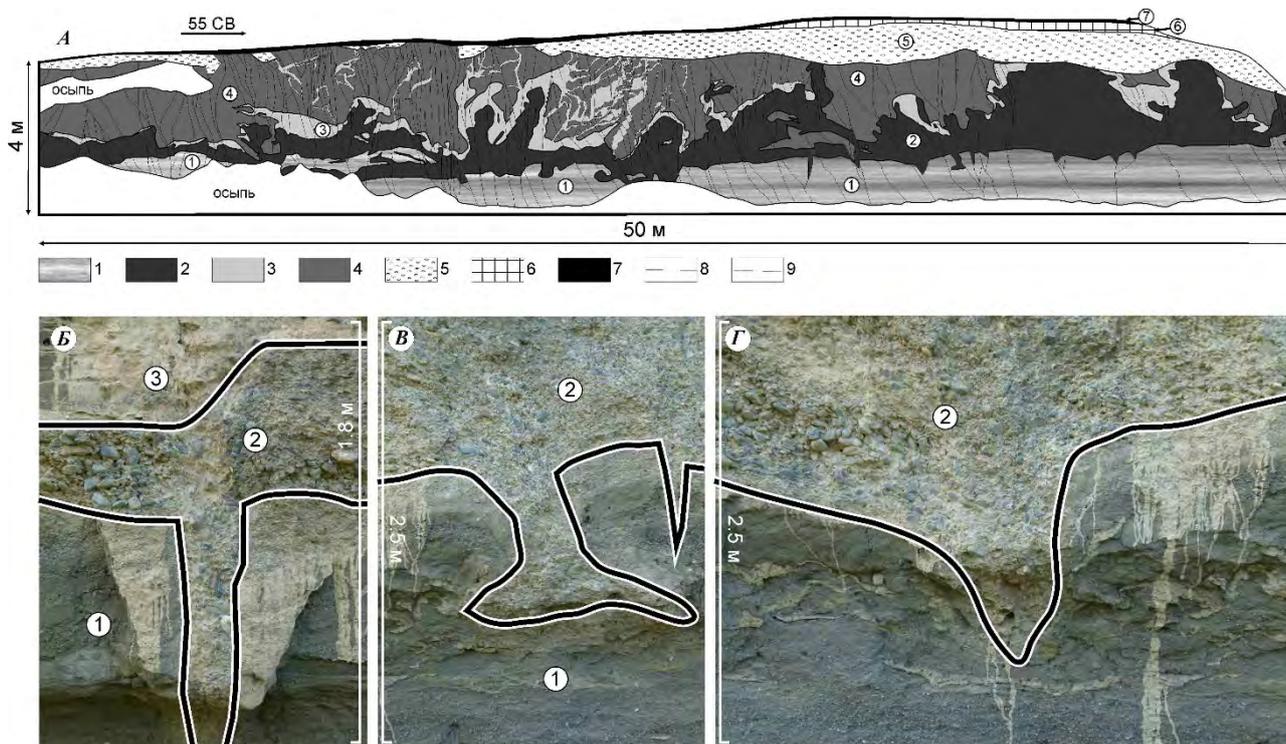


Рис. 2. Разрез Малояломанский-2 (А) и структуры растяжения в кровле дресвяников пойменной фации ГПП слоя 1, заполненные русловыми аллювиальными галечниками слоя 2 (Б-Г)

1 – дресвяники пойменной фации ГПП; 2 – русловые галечники; 3 – пойменные пески и алевриты; 4 – делювий; 5 – русловые галечники; 6 – пойменные пески и алевриты; 7 – современная почва; 8 – разломы и трещины; 9 – границы даек и силлов.

повышаться до 7, а интенсивность до 8 баллов [9]. Неопределенность в определении положения эффектов разжижения и флюидизации от палеоэпицентра резко возрастает при увеличении магнитуды землетрясения. Так при  $M=5.0$ , они локализируются в пределах десятикилометровой зоны от эпицентра, при  $M=6.0$  – на расстоянии 30 км, а уже при  $M=7.0$  – 100 км, и на расстоянии до 300 км при  $M=8.0$ .

Аналогичные зависимости для инструментально зарегистрированных землетрясений с глубинами гипоцентров 10-40 км на территории гор южной Сибири, Монголии и северо-востока Казахстана показали, что и здесь эффекты разжижения и флюидизации возникают, начиная с пороговых значений  $M_s \geq 5.2$  и  $I_0 = 6-7$  (шкала MSK-64) [1]. При этом такие эффекты располагаются в несколько раз ближе к эпицентру, чем другие вторичные косейсмические эффекты и около половины их локализуется на расстоянии около 40 км от эпицентра. Для палеосейсмологических построений также важно, что около половины всей совокупности вторичных косейсмических эффектов и около 70 % случаев разжижения грунта сосредоточены в пределах 20 км от сейсмогенерирующего разлома, а в пределах 40 км — 78% и 90%, соответственно. В эту выборку попали и данные по Чуйскому землетрясению 2003 г.,

## **ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И АРХЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

при котором эффекты, связанные с разжижением и флюидизацией, наблюдались в Чуйской впадине на расстоянии от эпицентра до 50-55 км [7].

### **Выводы**

В результате проведенных исследований полученные новые палеосейсмологические данные по участку нижнего течения р. Малый Яломан. Они, с учетом ранее произведенных исследований [4], позволяют утверждать, что в районе Яломанского грабена в доисторическое время существовала зона концентрации землетрясений с  $M \geq 5-7$ , причем землетрясения более молодого возрастного уровня имели большие магнитуды. Наиболее крупное сейсмическое событие, по предварительным оценкам, могло произойти в интервале 10500-9700 л.н. Сейсмогенные деформации, обнаруженные в пределах Яломанского грабена, вкуче с палеосейсмологическими и археосейсмологическими данными по Манжерокскому и Чемальскому грабенам [2], указывают на то, что на протяжении среднего плейстоцена-голоцена в пределах Горного Алтая существовала крупная сейсмогенерирующая структура - Катунский раздвиг.

Полученные данные говорят в пользу того, что территории, прилегающие к Катунскому раздвигу и характеризующиеся в настоящее время относительно малочисленными и низкомагнитудными сейсмическими событиями, обладают куда более значимым сейсмическим потенциалом.

### **Список литературы**

1. Андреев А.В., Лунина О.В. Параметры землетрясений и пространственное распределение косейсмических эффектов на юге Сибири и Монголии // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2012. – т. 39, № 2. – С. 37–68.
2. Деев Е.В., Зольников И.Д., Бородовский А.П., Гольцова С.В. Неотектоника и палеосейсмичность долины нижней Катунки (Горный Алтай) // Геология и геофизика. – 2012. – т. 53, № 9. – С. 1154-1168.
3. Деев Е.В., Зольников И.Д., Гольцова С.В., Русанов Г.Г., Еманов А.А. Следы древних землетрясений в четвертичных отложениях межгорных впадин центральной части Горного Алтая // Геология и геофизика. – 2013. – т. 54, № 3. – С. 410-423.
4. Деев Е.В., Зольников И.Д., Гуськов С.А. Сейсмичность в четвертичных отложениях Юго-Восточного Алтая // Геология и геофизика. – 2009. – т. 50, № 6. – С. 703–722.
5. Зольников И.Д. Стратотипы четвертичных отложений Яломано-Катунской зоны Горного Алтая // Геология и геофизика. – 2008. – т. 49, № 9. – С. 906–918.
6. Никонов А.А. Сейсмодетформации в рыхлых отложениях и их использование в палеосейсмологических реконструкциях // Проблемы современной сейсмогеологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии: Материалы совещания. Иркутск, ИЗК СО РАН. – 2007. – т. 2. – С. 54-59.
7. Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Ушанова Е.А. Тектоническая позиция и геологические проявления Алтайского землетрясения // Геотектоника. – 2007. – № 2. – С. 3-22.

***ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И АРХЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ***

8. Русанов Г.Г., Орлова Л.А. Радиоуглеродные датировки (СОАН) Горного Алтая и Предальтайской равнины. Бийск: ФГБОУ ВПО «АГАО», – 2013. – С. 291.
9. Bezerra F.H.R., Fonseca V.P., Vita-Finzi C., Lima-Filho F.P., Saadi A. Liquefaction-induced structures in Quaternary alluvial gravels and gravels sediments, NE Brazil // *Engineering Geology*. – 2005. Vol. 76. – P. 191-208.
10. Obermeier S.F. Use of liquefaction-induced features for paleoseismic analysis – An overview of how seismic liquefaction features can be distinguished from other features and how their regional distribution and properties of source sediment can be used to infer the location and strength of Holocene paleo-earthquakes // *Engineering Geology*. – 1996. Vol. 44. – P. 1–76.

**ИЗУЧЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПРИМОРЬЯ (С ПОЗИЦИЙ СТРОИТЕЛЬСТВА)**

**Федюк Р.С., Мочалов А.В., Тимохин А.М., Муталибов З.А., Ильинский Ю.Ю.**

*Учебный военный центр ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, ул. Экипажная, 18, e-mail: roman44@yandex.ru*

Отмечены недостатки сейсмических карта, применявшихся в строительстве вплоть до рубежа XX-XXI вв. Практически все здания, построенные в советское время и в новейшей российской истории, не соответствуют необходимым антисейсмическим требованиям. Рассматривая вопрос стоимости антисейсмической защиты, можно с уверенностью утверждать, что эти затраты весьма незначительны, при этом увеличение прочности, жесткости и т.д. здания приведёт к увеличению срока службы объекта, явному экономическому эффекту от дополнительного срока эксплуатации.

Ключевые слова: сейсмический режим, Приморье, строительство, усиление зданий, повышение устойчивости.

**SEISMIC PRIMORYE MODE (FROM POSITIONS OF CONSTRUCTION)**

**Roman S. Fediuk, Aleksandr V. Mochalov, Andrey M. Timokhin, Zabur A. Mutalibov, Yuriy Yu. Pyinskiy**

*Military training center of Far Eastern Federal University, Vladivostok, 18 Ekipazhnaya Str, e-mail: roman44@yandex.ru*

Noted deficiencies seismic map used in construction until the turn of XX-XXI centuries. Almost all of the buildings built in the Soviet era and in modern Russian history, not meet the necessary requirements antiseismic. When considering the cost of anti-seismic protection, we can confidently say that these costs are insignificant, and the increase in strength, hardness, etc. the building will increase the life of the object, the apparent economic effect of the additional period of operation.

Keywords: seismic regime, Primorye, construction, reinforcement of buildings, increase the stability.

До настоящего времени, невозможно предсказать, где, когда и с какой силой произойдет землетрясение. Можно лишь говорить о вероятности, с которой может произойти землетрясение в каждом конкретном районе.

До 1997 года Приморский край согласно строительным регламентирующим документам не проходил как сейсмически опасный регион. Соответственно, и все возведенные на территории края здания были не рассчитаны на сейсмические нагрузки и воздействия. С

### ***СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕРРИТОРИИ РФ***

позиций того времени, это было выгодно строителям (как, впрочем, и заказчикам строительства); проблемы безопасности людей отступали на второй план перед экономией денежных средств. Учеными и инженерами признается, что карта сейсмического районирования образца 1978 г. значительно занижала сейсмическую опасность территории Приморского края, где все строительство, соответственно, велось без должных антисейсмических мер [1]. Территориальные строительные нормы ТСН 22-301-95 ПК «Список населенных пунктов, расположенных в сейсмических районах Приморского края» также занижают показатели сейсмической опасности практически для всех населенных пунктов края.

И лишь начиная с 1997 года на карте Приморья начали появляться сейсмически опасные районы. На карте ОСР-97-В к 8-балльной зоне были приравнены районы Находки и Партизанска [2]. Согласно [3], на карте ОСР-97-С большая часть края (исключая центральную и юго-западную части) была обозначена 8-балльной зоной. На карте ОСР-97-Д были обозначены уже 9-балльные районы, в частности на юго-западе Приморского края [4]. Следует отметить, что карты ОСР-97 (А, В, С, Д) характеризуют риски соответственно 10, 5, 1% и 0,5% возможного превышения в течение 50-летних интервалов времени величин сейсмической интенсивности, указанной в их зонах, что показывает повторяемость такого сейсмического эффекта в любом пункте зон в среднем один раз за 500, 1000, 5000 и 10 000 лет. Таким образом, Комплект карт ОСР-97 позволяет оценивать на трех уровнях степень сейсмической опасности и предусматривает осуществление антисейсмических мероприятий при строительстве объектов трех категорий, учитывающих ответственность сооружений: карта А - массовое строительство; карты В и С - объекты повышенной ответственности и особо ответственные объекты.

И даже несмотря на сильно ужесточившиеся нормы, согласно данным Научно-исследовательского центра «Сейсмозащита», существующая карта сейсмического районирования России (комплект карт ОСР-97 А, В, С) занижает сейсмическую опасность Приморского края на 1-2 балла [5].

А согласно карте ДСР-2002 9-балльные участки были выделены в Хасанском районе, в районе Партизанска и Преображения. И согласно тому же источнику были выделены даже 10-балльные районы (в северном Приморье).

Очевидно, что по сравнению с первой официальной картой сейсмического районирования, на картах 1997 года значительно повысилась балльность территории края, но самое поразительное то, что при составлении карты использовались те же сейсмические исходные, что и ранее [2].

## ***СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕРРИТОРИИ РФ***

В 2001 г. Правительство России, оценив серьезность ситуации, утвердило Федеральную целевую программу «Сейсмобезопасность территории России», которая была рассчитана на 2002–2010 гг. Однако эта программа, не успев начаться, была прекращена постановлением правительства из-за неудовлетворительной организации работ и неполноценности получаемых результатов.

Анализируя имеющийся статистический материал, начиная с первых зафиксированных наблюдений в Приморском крае (с 1867 г.), можно сделать вывод об отсутствии сильных землетрясений, сейсмическая опасность отмечается умеренная – 7-8 баллов [6-7]. Но при всем при этом не стоит забывать, что в высокосейсмичных областях Земли катастрофические землетрясения (от 9 до 12 баллов) происходят с периодичностью 250-500 (кА то и более) лет. Таким образом, становится ясно, что период инструментальных наблюдений в Приморском крае слишком мал, чтобы делать какие-либо обоснованные выводы о сейсмической активности и опасности данного региона.

Территория Приморья в сейсмологическом отношении изучена недостаточно из-за отсутствия здесь полноценных сейсмометрических наблюдений. Наряду с внутрикоровыми землетрясениями в юго-западной части Курило-Камчатской зоны субдукции, ощущаются также глубокофокусные землетрясения. В частности, землетрясения в акватории нередко сопровождаются цунами.

Если рассматривать в целом территорию Дальнего Востока, то известно, что в последние десятилетия в регионе наблюдается усиление сейсмической активности на уровне сильных землетрясений. В 1995 г. произошло девятибалльное Нефтегорское землетрясение на о. Сахалин, спустя пять лет - Углегорское (на юго-западном шельфе Сахалина), в 2007 г. - Невельское (8-9 баллов).

Непосредственно на территории Приморья наиболее высокая сейсмичность установлена в Южной части края. Здесь выделяются два района по своим сейсмическим характеристикам: Ханкайский массив (на юго-западе) и Юг Приморья. В Южном Приморье известно несколько сравнительно сильных землетрясений в районе Партизанска (1933, 1962, 1971 годы) с интенсивностью сотрясений до семи баллов.

На самом юге Приморского края в 50-х годах прошлого века произошло два землетрясения. Одно в 1955 году на западном побережье Амурского залива с интенсивностью семь баллов в пос. Приморском. Здесь были повреждены все строения, включая деревянные. Более слабое землетрясение было отмечено в районе пос. Шкотово-Артема в 1950 году.

Некоторую достоверность может нести информация о палеоземлетрясениях за последние 10 тыс. лет. Большую работу в этом направлении проделали сотрудники ФГУПП «Приморская поисково-съёмочная экспедиция» А.В. Олейников и Н.А. Олейников [2,4].

## ***СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕРРИТОРИИ РФ***

Согласно их исследованиям, сейсмический режим в Приморском крае можно считать умеренным, так как за последние почти полтора века не было отмечено ни одного крупного землетрясения. Но определенные опасения все равно имеются. Они связаны с тем, что в горах обнаружены сейсмодислокации, которые свидетельствуют о возможности сильных землетрясений, правда на ограниченной площади и в отдалении от населенных пунктов. Сейсмическая опасность Восточной зоны Приморья составляет на некоторых участках 7-8 баллов, Западной – до 10 баллов.

Согласно геологическим исследованиям, территории Приморского края ранее была свойственна повышенная тектоническая активность, которая сопровождалась большими горизонтальными и вертикальными колебаниями и деформациями земной коры, а также всей литосферы. Здесь выявлено более десяти крупных и огромное количество более мелких тектонических разломов. Основным структурным элементом, который определяет геологическое и тектоническое строение Приморья, служит Центральный Сихотэ-Алиньский разлом, который пересекает территорию Приморского и Хабаровского краев с юго-запада на северо-восток практически по прямой линии. Он явно выражен в рельефе и прослеживается на космических фотоснимках на протяжении свыше тысячи километров. Основные, левосторонние, смещения по нему произошли в позднем мелу, а их суммарная амплитуда по разным оценкам достигает 200 км. Значительные горизонтальные и вертикальные подвижки обнаружены также в ряду других разломов Приморья.

Для приобретения более полной и точной информации, необходимо выявление очагов сейсмической активности. Наблюдение да этими очагами позволит оперировать достоверной информацией.

Лишь в 2009 г. ОАО «ПНИИИС» начало работу над краевой целевой программой «Сейсмобезопасность территории Приморского края» в рамках Федеральной целевой программы «Повышение устойчивости основных объектов и систем жизнеобеспечения в сейсмоопасных районах Российской Федерации» на 2009–2017 гг.

Очевидно, что для объектов повышенной ответственности, а также особо ответственных инженерных сооружений, расположенных в зонах высокой сейсмичности, необходимо производить гораздо более тонкие расчеты с использованием инструментальных записей ускорений колебаний оснований сооружений и привлечением к анализу синтезированных акселерограмм, в т. ч. учитывающих резонансные свойства грунтов и длительность сейсмических колебаний.

По ориентировочным оценкам, от 60 - 90 % зданий и сооружений в городах и населённых пунктах Приморья должны быть отнесены к несейсмостойким, а с учётом техногенных изменений грунтов основания дефицит сейсмостойкости по отдельным объектам

### **СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕРРИТОРИИ РФ**

составит 1-3 балла. Исследования, проведенные специалистами НПЦ «Сейсмозащита», показали, что разница в стоимости строительства в сейсмических районах Дальнего Востока, по сравнению с несейсмическими, в среднем составляет для 7-мибалльных зон - 4%, 8-мибалльных - 8% и 9-тибалльных - до 12% [5]. Таким образом, не рассматривая человеческий фактор, возможные социальные, экономические, экологические и т.п. потери от возможных землетрясений, а только вопрос стоимости антисейсмической защиты, можно с уверенностью утверждать, что эти затраты весьма незначительны, при этом увеличение прочности, жесткости и т.д. здания приведёт к увеличению срока службы объекта, явному экономическому эффекту от дополнительного срока эксплуатации.

#### **Список литературы**

1. Уломов В.И. К оценке сейсмической опасности территории Приморского края // Инженерные изыскания. – 2009. - №1. – С. 40-46.
2. Олейников А.В., Олейников Н.А. Палеосейсмогеология и сейсмическая опасность Приморского края // Вестник ДВО РАН. – 2006. - №3. – С. 76-84.
3. Природные опасности России. Т.2. Сейсмическая опасность. – М.: Крук, 2000. – 296 с.
4. Олейников А.В., Олейников Н.А. Геологические признаки сейсмичности и палеосейсмогеология Южного Приморья. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 185 с.
5. Сейсмичность территории Приморья: группа компаний «Сейсмозащита» URL: <http://http://www.npcss.ru/index.php?id=27> (дата обращения: 03.07.2015).
6. Оскорбин Л.С. Районирование юга Дальнего Востока по сейсмогенным зонам // Цунами и сопутствующие явления. - Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. - С. 111–153. (Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией; т. 7).
7. Оскорбин Л.С., Бобков А.О. Сейсмический режим сейсмогенных зон юга Дальнего Востока // Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. - С. 179–197. (Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией; т. 6).

## **ТЕОРИЯ ПОДОБИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ И ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ**

<sup>1</sup> Герман В.И.

*<sup>1</sup>ГПКК «Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья»  
(ГПКК «КНИИГиМС»), 660049, Красноярск, пр. Мира, 55, e-mail: german3v@yandex.ru*

Рассмотрена теория масштабирования функций распределения временных и пространственных характеристик в сейсмологии, соответствующая предположению о подобии структуры сейсмичности в разных энергетически-пространственно-временных интервалах. Приведен пример ее проверки на данных Токтогульского района (Киргизия).

Ключевые слова: теория подобия, структура сейсмичности

## **SCALING THEORY OF SPATIAL AND TEMPORAL SEISMICITY STRUCTURE**

<sup>1</sup> Victor I. German

*<sup>1</sup> Krasnoyarsk Research Institute of Geology and Minerals, 660049, Russia, Krasnoyarsk, Mira av.,  
55, e-mail: german3v@yandex.ru*

The scaling theory of the distribution functions of temporal and spatial characteristics in seismology is considered. It corresponds to assumption of the similarity of seismicity structure in the various energy-space-time intervals. An example of its checks on the data of the Toktogul district (Kyrgyzstan) is shown.

Keywords: scaling theory, seismicity structure

### **Введение**

Структура сейсмичности, т.е. регистрируемой последовательности сейсмических событий, является основной информацией для понимания физических процессов, идущих в земной коре. Ее изучение является важной научной задачей и необходимо для прогноза сильных сейсмических событий.

Для анализа структуры сейсмичности необходимо зафиксировать энергетическо-пространственно-временной интервал (ЭПВИ), который будет определять набор рассматриваемых сейсмических событий. ЭПВИ задается начальными значениями энергии  $E$ , координат  $X$  и  $Y$ , времени  $T$ , а также величин их приращения:  $E_I, \Delta E_I; X_I, \Delta X_I, Y_I, \Delta Y_I, Z_I, \Delta Z_I; T_I, \Delta T_I$ . В дальнейшем ЭПВИ с такими параметрами будем обозначать  $I$ .

**ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

Вместо параметров  $E_I$  и  $\Delta E_I$ , задающих значения энергии, можно использовать значения магнитуды  $M_I$  и  $\Delta M_I$ .

В качестве основных характеристик сейсмичности в данной работе рассматриваются времена ожидания между хронологически последовательными сейсмическими событиями в ЭПВИ  $\Delta T$  (Рис. 1), а также новая характеристика  $\Delta d_{\min}$  – минимальное расстояние от текущего события до самого близкого (в пространстве) соседнего события в ЭПВИ (Рис. 2) [3, 10].

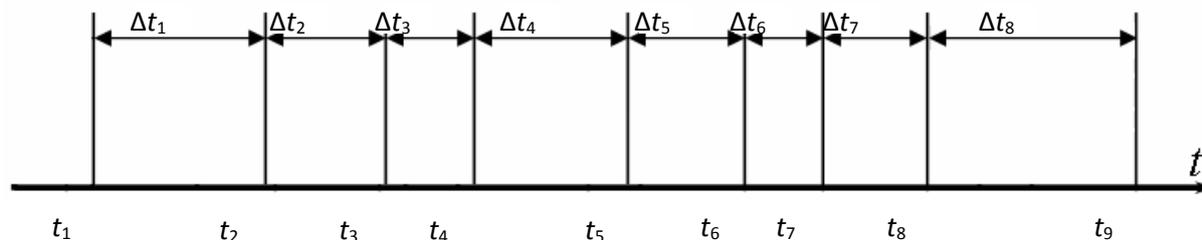


Рис. 1. Времена ожидания сейсмических событий  $\Delta t$  (времена возникновения событий отмечены вертикальными линиями)

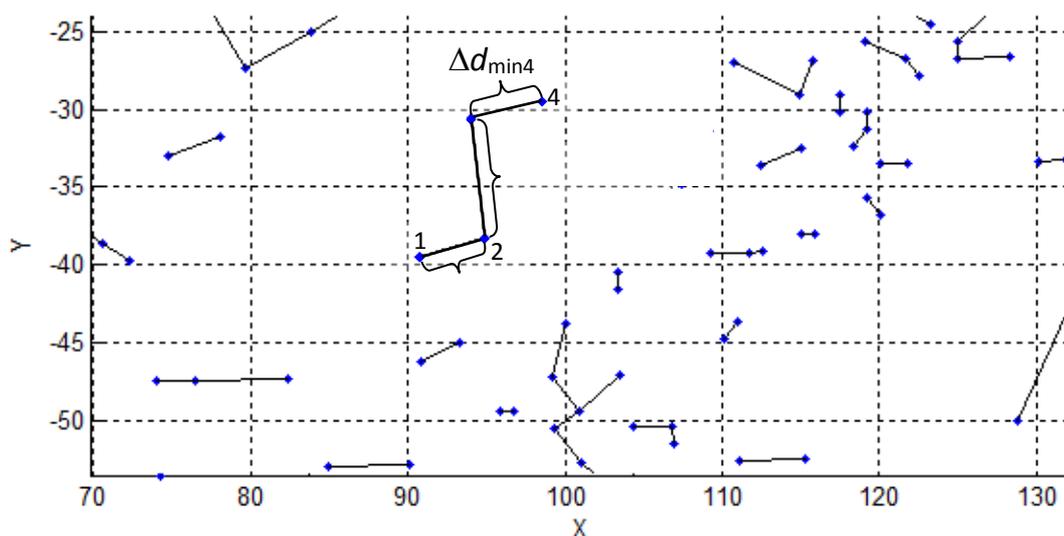


Рис. 2. Минимальные расстояния между сейсмическими событиями  $\Delta d_{\min}$  (события обозначены точками, ближайшие события соединены отрезками, их длина соответствует значению  $\Delta d_{\min}$ )

Распределения характеристик  $\Delta T$  и  $\Delta d_{\min}$  позволяют оценивать временной интервал до следующего сейсмического события, а также удаление нового события от ранее зарегистрированных в ЭПВИ событий. Поэтому эти характеристики очень важны для оценки сейсмической опасности.

Представленные ниже положения могут быть применимы и к другим характеристикам сейсмичности.

**ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ  
И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ**  
**Основное условие самоподобия структуры сейсмичности**

Идея самоподобия процесса разрушения в горной породе/земной коре позволяет сформулировать основное предположение о самоподобии сейсмичности следующим образом: сейсмичность в одном ЭПВИ – масштабная версия сейсмичности в другом ЭПВИ. Это подобие не абсолютное, но статистическое, т.е. функция распределения характеристики, рассматриваемой в фиксированном ЭПВИ, является масштабной (сжатой или растянутой по оси ординат) версией базовой функции распределения (Рис. 3) [1-3, 10].

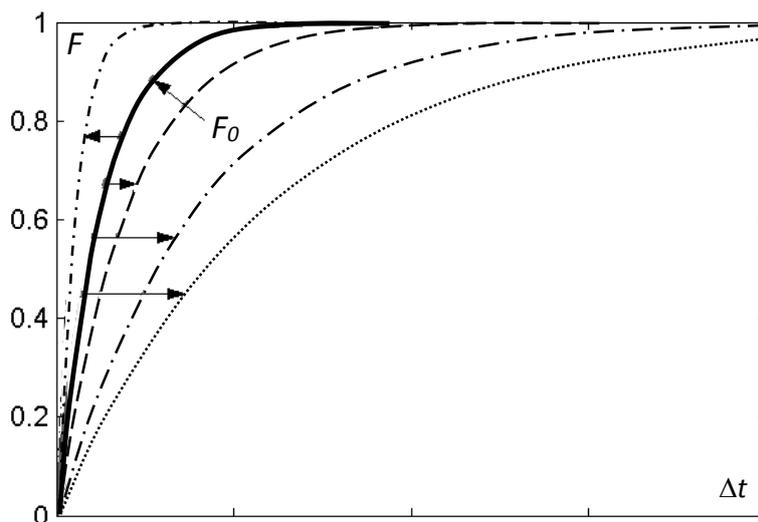


Рис. 3. Масштабирование базовой функции распределения временных интервалов  $F_0$

Самоподобие структуры сейсмичности означает, что функции распределения какой-либо характеристики сейсмичности для различных ЭПВИ принадлежат к одному и тому же семейству, отличаясь только масштабным коэффициентом, который учитывает параметры ЭПВИ. В частности, он отражает тот факт, что слабые сейсмические события наблюдаются чаще сильных, а также то, что на более протяженной области и за более продолжительный срок регистрируется большее число сейсмических событий. При этом структура сейсмичности, т. е. соотношение числа относительно малых значений рассматриваемой характеристики к относительно большим, должна оставаться постоянной.

Обозначим случайную величину, соответствующую исследуемой характеристике, через  $V$ , а соответствующую ей переменную, являющуюся аргументом функции распределения и функции плотности вероятности, – через  $v$ .

При введенных обозначениях основное утверждение самоподобия сейсмичности может быть сформулировано для функции распределения характеристики:

$$F(v | I) = F(v) = F_0(v / \langle v \rangle), \tag{1}$$

или для соответствующей функции плотности вероятности:

$$f(v|I) = f(v) = \frac{dF(v)}{dv} = \frac{f_0(v / \langle v \rangle')}{\langle v \rangle'}, \quad (2)$$

где  $F_0$  и  $f_0$  – постоянные функции, не зависящие от ЭПВИ;  $\langle v \rangle'$  – коэффициент масштабирования для характеристики  $v$ , зависящий от параметров интервала  $I$ .

Согласно уравнению (1) функция распределения  $F$  является масштабной версией функции  $F_0$  (см. Рис. 1). Таким образом, выражение (1) может быть переписано в следующем виде:

$$V = \langle v \rangle' V_0, \quad (3)$$

где  $V_0$  – базовая случайная величина, имеющая распределение  $F_0$ , или случайная величина  $V$ , для ЭПВИ, которому соответствует коэффициент масштабирования  $\langle v \rangle' = 1$ . Это означает, что случайная величина  $V / \langle v \rangle' = V_0$  имеет постоянную функцию распределения  $F_0$ , не зависящую от масштабного уровня.

Выражения (1) и (2) означают, что распределение  $F$  принадлежит к семейству масштабируемых распределений [6]. Однако заметим, что при этом не налагается никаких ограничений на форму базовой функции распределения  $F_0$ .

Наиболее часто используемые семейства распределений, являющиеся масштабируемыми, – это экспоненциальное, гамма-распределение, Вейбулла и степенное (без ограничения) [6]. Они нашли достаточно широкое распространение при описании времен ожидания между хронологически последовательными событиями в ЭПВИ. Однако в ряде случаев для этих целей применяют логарифмически-нормальное распределение, но оно не является масштабируемым семейством распределений, что не позволяет описывать с его помощью временную структуру сейсмичности ожидания для различных ЭПВИ.

#### **Общее выражение для коэффициента масштабирования функций распределения характеристик сейсмичности**

Вычисление математического ожидания от обеих частей уравнения (3) показывает, что математическое ожидание случайной величины  $V = \langle V \rangle$  для некоторого ЭПВИ пропорционально коэффициенту масштабирования  $\langle v \rangle'$ :

$$\langle V \rangle = \langle v \rangle' \langle V_0 \rangle = \text{const} \langle v \rangle'. \quad (4)$$

Следовательно, для получения функции распределения характеристики  $F$  для некоторого ЭПВИ из базовой функции распределения  $F_0$  можно использовать коэффициент масштабирования  $\langle v \rangle' = \text{const} \langle V \rangle$ . (5)

**ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ  
И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

Согласно уравнению (5) наравне со случайной величиной  $V / \langle V \rangle' = V_0$  безразмерная случайная величина  $V / \langle V \rangle$  также будет иметь постоянную функцию распределения, не зависящую от параметров ЭПВИ.

Однако на практике значение математического ожидания  $\langle V \rangle$  неизвестно, хотя оно может быть оценено с помощью выборочного среднего характеристики  $V$  для выбранного ЭПВИ, которое является его состоятельной, несмещенной и асимптотически эффективной оценкой.

Пример построения масштабированных функций распределения времени ожидания  $\Delta T$  и минимальных расстояний  $\Delta D_{\min}$  для сейсмичности Токтогульского района (на Рис. 4) показывает, что вид функции распределения слабо зависит от выбранных для их построения ЭПВИ. Анализ распределений  $\Delta T$  и  $\Delta D_{\min}$  других регионов приведен в [1 – 3, 9, 10].

Коэффициенты масштабирования могут также определяться через другие соотношения, основанные на модели ускоренных испытаний или закона Гутенберга-Рихтера [1 – 4, 7 – 10].

Применение теории подобия пространственной и временной структуры сейсмичности открывает ряд новых возможностей. В частности, отклонения от подобия функций распределения  $\Delta T$  и  $\Delta D_{\min}$  могут использоваться для выделения сейсмических событий, регистрация которых не представительна [5]. Вариации формы распределения могут также говорить о различных тектонических режимах территорий [4]. Возможны и другие применения разработанной теории.

### **Заключение**

В статье рассмотрена теория масштабирования функций распределения временных и пространственных характеристик в сейсмологии, соответствующая предположению о подобии структуры сейсмичности в разных энергетически-пространственно-временных интервалах.

Проверка разработанной теории и полученных соотношений для различных сейсмоактивных регионов велась для двух характеристик: времени ожидания между землетрясениями  $\Delta T$  и нового параметра  $\Delta D_{\min}$ , который является минимальным расстоянием от текущего сейсмического события до ближайшего (в пространстве) события в некотором энергетическо-пространственно-временном интервале. Распределение  $\Delta T$  и  $\Delta D_{\min}$  позволяет оценить временной интервал до следующего землетрясения и удаленность очередного землетрясения от произошедших ранее.

Таким образом, эти характеристики очень важны для оценки сейсмической опасности.

**ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ  
И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

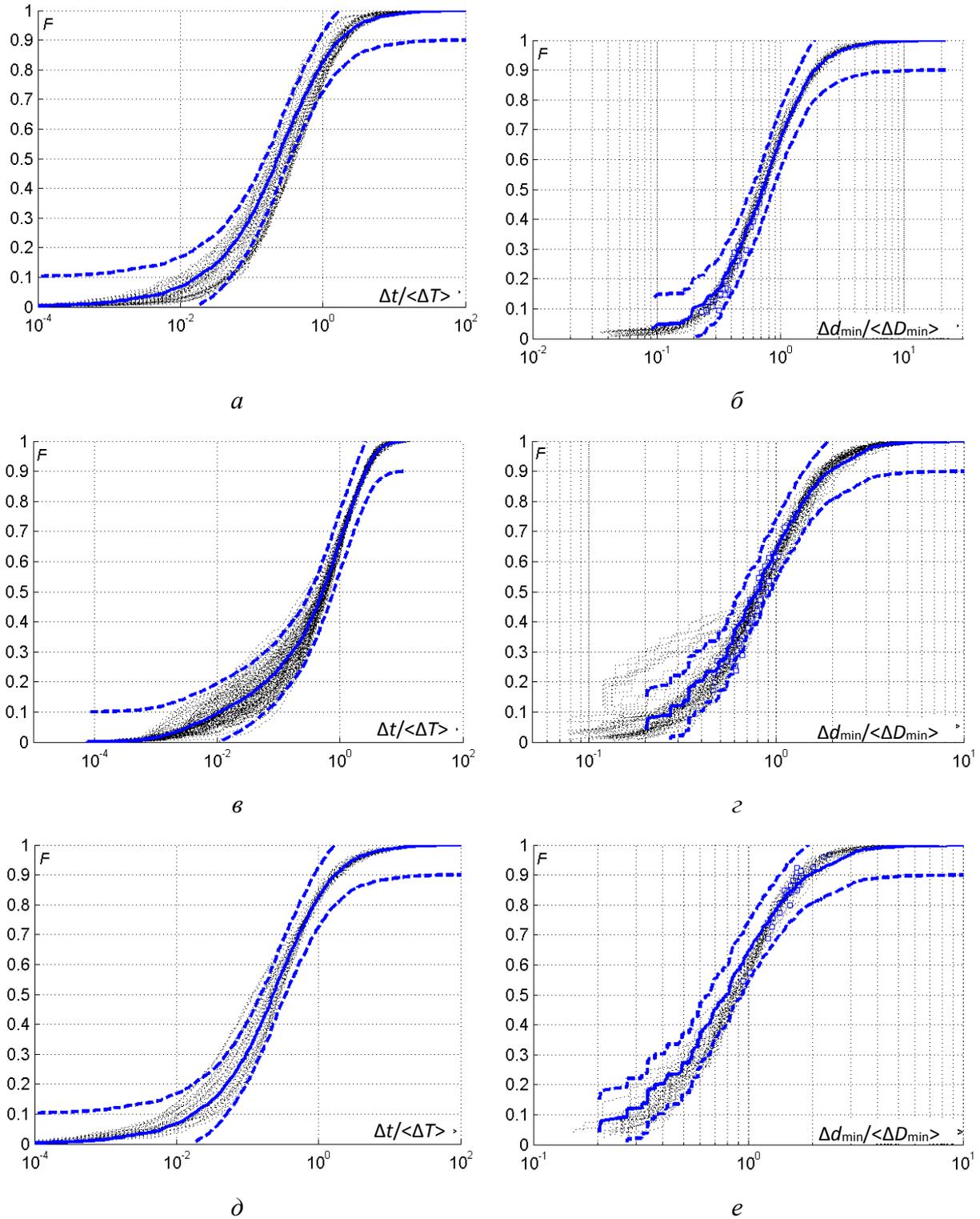


Рис. 4. Функции распределения времен ожидания  $\Delta T$  (*a*, *в*, *д*) и расстояний  $\Delta D_{\min}$  (*б*, *г*, *е*), масштабированные коэффициентами  $\langle \Delta T \rangle$  и  $\langle \Delta D_{\min} \rangle$  соответственно, для Токтогульского района с изменением параметров ЭПВИ

$$a, б - E_I \text{ и } \Delta E_I; в, г - T_I \text{ и } \Delta T_I; д, е - X_I, Y_I \text{ и } \Delta X_I = \Delta Y_I = \Delta L_I$$

**ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ  
И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

Масштабирование распределений с применением основного выражения для коэффициента масштабирования было успешным как для всех энергетическо-пространственно-временных интервалов в случае характеристики  $\Delta D_{\min}$ , так и для различных энергетических диапазонов (масштабных уровней) в случае  $\Delta T$ . На примере сейсмичности Токтогульского района показана работоспособность теории, заключающаяся в стабильности масштабированных функций распределения  $\Delta T$  и  $\Delta D_{\min}$ .

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-05-00158 А и 14-45-04157 р\_сибирь\_а).*

### **Список литературы**

1. Герман В.И. Самоподобие временных интервалов между актами разрушения в горных породах на различных масштабных уровнях. // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: Материалы 1-й Международной школы-семинара. (9-15 сент. 2001 г. Красноярск). Красноярск: СибГАУ, 2002. С. 66-72.
2. Герман В.И. Самоподобие временной структуры сейсмических событий на разных масштабных уровнях. // Вулканология и сейсмология. – 2005. – № 3. С. 66-74.
3. Герман В.И. Единая теория подобия структуры сейсмичности: статистический подход. – Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2010. – 80 с.
4. Герман В.И. Выделение аномалий структуры сейсмичности и их связь с тектоническим строением территории. // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы Второй молодежной школы-семинара. – М.: ИФЗ, 2011. Т. 1.
5. Герман В.И. Новый подход к выделению представительных данных в каталогах сейсмических событий. // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Шестой Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 69-78.
6. Кокс Д.Р., Оукс Д. Анализ данных типа времени жизни: пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 191 с.
7. Bak P., Christensen K., Danon L. and Scanlon T. Unified Scaling Law for Earthquakes. // Phys. Rev. Lett. 88, 178501, 2002.
8. Corral A. Long-term clustering, scaling, and universality in the temporal occurrence of earthquakes. // Phys. Rev. Lett. 92, 108501, 2004.
9. German V. Analysis of temporal structures of seismic events on different scale levels // Pure and Applied Geophysics. – 2006. – Vol. 163, № 10. – Pp. 2243–2258.
10. German V.I. Unified scaling theory for distributions of temporal and spatial characteristics in seismology. // Tectonophysics, Vol. 424, № 3-4, 2006. Pp. 167-175.

**ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ПРОГНОСТИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ  
ЮЖНОЙ ЯКУТИИ. ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОСТЬ**

**<sup>1,2</sup>Трофименко С.В., <sup>1</sup>Гриб Н.Н.**

<sup>1</sup>*Технический институт (филиал) ФГАОУ ВПО «Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Амосова» в г. Нерюнгри, 678960 Республика Саха (Якутия), г. Нерюнгри, ул. Кравченко, 16, e-mail: urovsky@yandex.ru*

<sup>2</sup>*Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, Хабаровск, ул. Ким ЮЧена, 65*

Представлены результаты геофизического мониторинга геологической среды в период сейсмической активизации Олекмо-Становой зоны. Установлено соответствие периодов геофизической и сейсмической активизаций. Моделирование двух процессов позволило идентифицировать аномалии в геофизических полях как предвестники землетрясений. Показаны условия применения геофизических методов для прогноза землетрясений.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, геофизический мониторинг, прогноз землетрясения, Южная Якутия.

**GEOPHYSICAL RESEARCH ON SOUTH PROGNOSTIC POLYGONS YAKUTIA. PAST  
AND PRESENT**

**<sup>1,2</sup>Sergei V. Trofimenko, <sup>1</sup>Nikolai N. Grib**

<sup>1</sup>*Technical Institute (branch of) North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov in Neriungry, 16 Kravchenko Str. e-mail: urovsky@yandex.ru*

<sup>2</sup>*Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia*

The results of the geophysical monitoring of the geological environment in the period of seismic activity Olekmo-Stanovoi zone. The correspondence periods of geophysical and seismic activity. Modeling of the two processes has allowed to identify anomalies in geophysical fields as the precursors of earthquakes. The conditions of application of geophysical methods to prediction earthquakes.

Keywords: electromagnetic radiation, geophysical monitoring, earthquake prediction, South Yakutia.

**Введение**

Геофизический мониторинг геологической среды – одно из основных направлений геодинамических исследований, который позволяет дистанционно отслеживать процессы в земной коре. Для проведения мониторинговых наблюдений пункты наблюдений выбираются

**ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ  
И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

с учетом активности современных тектонических структур: в зоне влияния Южно-Якутского надвига и южной ветви Северо–Станового разлома, к западному флангу которых приурочены два сильных землетрясения Южной Якутии: Тас-Юряхское 1967 г. и Южно–Якутское 1989 г. с магнитудами  $M7$  и  $M6,6$  соответственно, а также землетрясения 2005 – 2007 гг.

За время наблюдений отмечено 3 периода повышенной сейсмической активности в ОСЗ: в 1989 г. и 2005–2007 гг. Аномальные изменения в электромагнитных полях, предвещающие землетрясения с энергией более  $10^{13}$  Дж в эти периоды, были ассоциированы с сейсмотектоническими процессами в земной коре [3]. Произошедшее землетрясение 20.04.89 г. с энергией  $E=10^{16,5}$  Дж ( $K = \lg E = 16,5$  – энергетический класс землетрясения) позволило сопоставить аномальные суточные вариации ЭМИ с динамикой афтершоковых последовательностей [4] (Рис. 1).

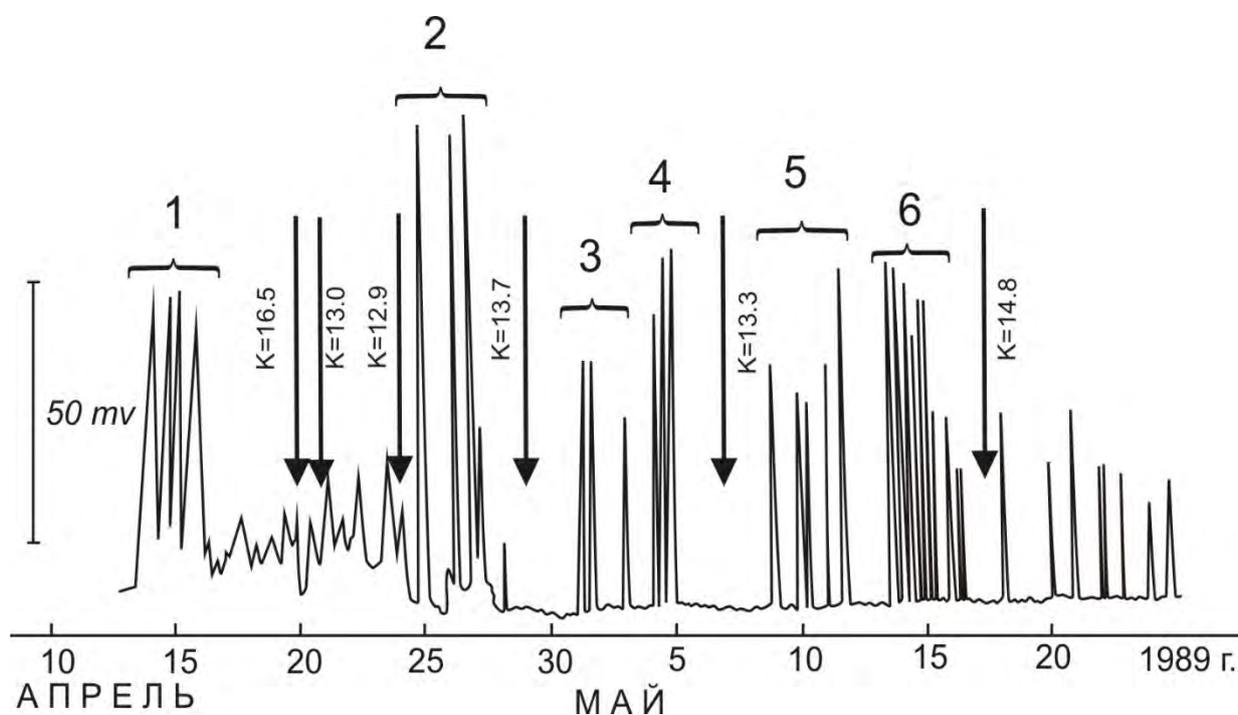


Рис. 1. Изменения напряженности ЭМИ в апреле–мае 1989 г. в период Южно-Якутского землетрясения и его афтершоков

Стрелками отмечены моменты сейсмических событий с указанием энергетических классов ( $K=\lg E$ , где  $E$  – энергия землетрясения в Дж), скобками выделены серии аномалий с указанием их порядковых номеров

Изменение напряженности ЭМИ в моменты, предвещающие главное событие 20 апреля 1989 г. и его основные афтершоки 24 и 29 апреля, а также 7 и 17 мая проявилось в виде увеличения амплитуды сигналов в суточных вариациях в течение нескольких суток до события. Погрешность прогноза времени события составила  $\pm 2$  суток без указания на характер самого землетрясения: магнитуды, энергетического класса, интенсивности и места события.

## **ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

В течение второго цикла измерений в 2004–2007 гг. в ОСЗ отмечено два периода повышения сейсмической активности. В первом периоде произошло два землетрясения с энергией  $E = 10^{15,7}$  Дж – 10.11.2005 и  $E = 10^{14,8}$  Дж – 11.12.2005, во втором – также два землетрясения с энергией  $E = 10^{14,6}$  Дж – 03.03.2007 и  $E = 10^{14,2}$  Дж – 13.03.2007.

Во всех четырех случаях имели место аномальные суточные вариации ИЭМПЗ (Рис. 2, 3), зарегистрированные аппаратурой МГР–1 в каждом из двух пунктов измерений (Нерюнгри, Иенгра), в зоне влияния Северо–Станового разлома и Южно–Якутского надвига [5].

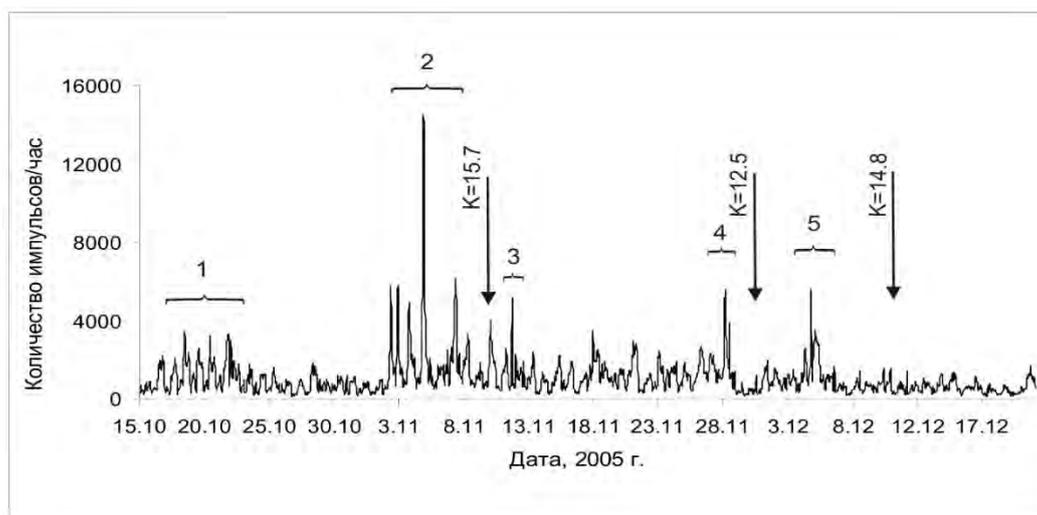


Рис. 2. Вариации ИЭМПЗ в пункте наблюдений «Нерюнгри» с 15.10. по 21.12. 2005 г. в период действия афтершоков землетрясения с энергией в очаге  $E=10^{14,6}$  Дж

Обозначения аналогичны Рис. 1.

### **Модели геофизических процессов**

Основные результаты геофизических исследований заключаются в следующем:

- первая серия аномалий 1989 г. зарегистрирована общей группой, предвещающей основное событие (см. Рис. 1). Первый и второй афтершоки не отмечены аномалиями ЭМИ. Третий афтершок ( $K=13,7$ ) отмечен аномалиями (вторая серия), аналогичными главному толчку.
- четвертый афтершок ( $K=13,3$ ) сопровождался аномалиями, разделенными нормальным суточным фоновым уровнем (серии 3, 4). Аналогичная ситуация проявилась и перед пятым афтершоком ( $K=14,8$ ): аномалия, длительностью около 7 суток, прерывается двухсуточным интервалом фоновой интенсивности ЭМИ (серии 5, 6).

В 2005 г. (см. Рис. 2) аномальные амплитуды суточного хода 17–22 октября не сопровождалось сейсмическим событием (серия 1). Первое землетрясение ( $K=15,7$ ) предвещалось серией аномалий, в максимуме интенсивности 15-тикратно превышающих нормальный фоновый уровень. После землетрясения в течение 2-х недель вплоть до 28.11.

**ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ  
И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

наблюдались аномальные амплитуды суточного хода на фоне многочисленных низкоэнергетических ( $K < 10$ ) сейсмических событий. Перед афтершоками  $K=12,5$  и  $K=14,8$

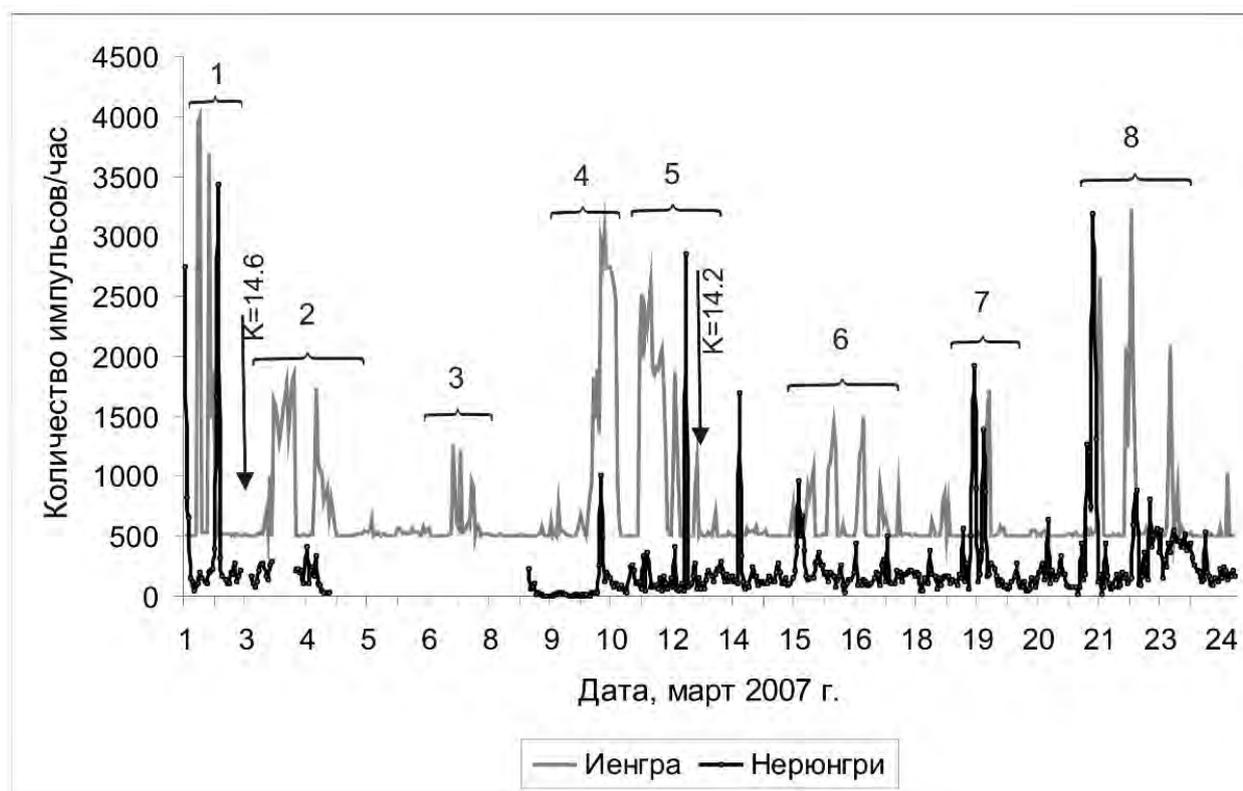


Рис. 3. Вариации ИЭМПЗ в пунктах наблюдений «Иенгра-Нерюнгри» с 1 по 25 марта 2007 г. в период действия афтершоков землетрясения с энергией в очаге  $E=10^{14,6}$  Дж.

Обозначения аналогичны Рис. 1.

изменения ИЭМПЗ были аналогичными (серии 4, 5). Следует отметить, что за два месяца до основного события (в сентябре) зарегистрирована аномалия с трехкратным превышением интенсивности сигнала в течение 5-ти суток относительно фонового уровня с отдельным всплеском 17.09. В заключительной стационарной фазе землетрясения не произошло.

Детальное рассмотрение Рис. 2 приводит к следующим результатам:

- аномальные всплески ЭМИ проявились 2, 4, 7, 9 ноября с максимумом 4-7 ноября;
- амплитуда аномалий более чем в 80 раз превышает максимальную амплитуду суточных вариаций;
- к моменту основного события амплитуда всплесков ЭМИ снизилась в 4 раза;
- максимум суточных вариаций повысился с 900 импульсов 2.11. до 14000 имп. 5.11. с выдержанностью от 1500 до 6000 имп. вплоть до момента основного события;
- землетрясение 10.11.2005 произошло на спаде суточной интенсивности ЭМИ;
- в течение четырех суток после 11.11., т. е. на спаде сейсмической активности, всплесков ЭМИ не наблюдалось;

**ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ  
И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

- с 15.11. – по 25.11. на относительном максимуме сейсмической активности очага появляются аномалии ЭМИ, не связанные с конкретным сейсмическим событием. Они возникают как до, так и во время и после землетрясений;

- все события после 25.11. произошли без аномальных изменений ЭМИ;
- третий относительный максимум сейсмической активности в начале декабря сопровождается интенсивными аномалиями ЭМИ, более чем в 150 раз превышающими амплитуды максимумов суточных вариаций;
- время появления аномалий ЭМИ не связано с временем сейсмических событий;
- группа аномалий по всем каналам проявилась за 7 суток до главного афтершока с  $K=13.5$  [Дж] землетрясения, произошедшего 11.12.2005. Аномалия в одном канале зарегистрирована 7.12., т. е. за 4 дня.

На четвертом относительном максимуме сейсмической активности афтершоков с 12.12. по 20.12.2005 г. амплитуда аномальных всплесков ЭМИ в 60 и более раз превосходит амплитуду суточных вариаций и не связана с конкретными сейсмопроявлениями.

В 2007 г. первая серия аномалий (см. Рис. 3) предвляла землетрясение с энергией в очаге  $E=10^{14.6}$  Дж, которая зафиксирована на обоих пунктах наблюдений. Вторая и третья серии аномалий отмечены в пункте «Иенгра» на фоне многочисленных афтершоков. Четвертая и пятая серии аномалий предвляла второе землетрясение с энергией в очаге  $E=10^{14.2}$  Дж. Шестая и седьмая серии с незначительными отличиями в пунктах наблюдений отмечены на фоне афтершоковых последовательностей второго землетрясения. Практически синфазные аномальные изменения ИЭМПЗ (8 серия) не сопровождалась землетрясением. До рассматриваемого периода наблюдений в феврале были выделены аномальные амплитуды с выходом в нормальное поле к 01.03. без сейсмического события.

Детальное рассмотрение временных изменений геофизических полей вследствие сейсмотектонических процессов привело к необходимости решения двух задач: поиск корреляционных зависимостей «аномалии ЭМИ – землетрясение» и определение предельного радиуса (сферы) влияния тектонических процессов на формирование геофизических предвестников землетрясений. Сложности интерпретации, которые при этом возникают, связаны с тем, что групп аномальных сигналов ЭМИ–ИЭМПЗ больше чем землетрясений и, следовательно, при наличии явных предвестников землетрясений нет возможности детерминированного прогноза событий. Это указывает на то, что аномалии ЭМИ в условиях современной активной геолого–тектонической структуры не являются достаточным (100%) признаком возможного повышения сейсмической активности. Вероятность наступления события (отношение числа прогнозных аномалий к общему числу зарегистрированных аномалий) оценивается как  $\frac{3}{4}$ , или 75%. В этой связи имеет смысл рассмотреть возможные

## **ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

варианты появления аномалий ЭМИ – ИЭМПЗ в соответствие с полученными результатами экспериментальных наблюдений.

Привлекая модель сейсмического процесса в блоковой среде, можно предположить, что аномалии ЭМИ должны проявляться дважды: в период консолидации блоков на начальной стадии формирования очага землетрясения и в период потери устойчивости консолидированных систем блоков, т.е. в периоды наибольшего упруго–кинематического взаимодействия между блоками. Учитывая данные о наблюдениях наклонов в период Южно–Якутского землетрясения [2] впервые предоставленные при анализе геофизических предвестников в период Южно – Якутского землетрясения и его афтершоков, можно заключить, что процесс накопления энергии упругих деформаций и процесс разгрузки среды не симметричны относительно главного события.

Следовательно, первые предвестники будут регистрироваться задолго до землетрясения, так как временной интервал от первых аномалий ЭМИ – ИЭМПЗ до момента землетрясения должен зависеть от скорости накопления упругих деформаций. Повторные аномалии могут проявляться как непосредственно перед событием, так и после него, т.к. измерения проводятся не в очаге, а на его периферии, а консолидированная область может начать разрушаться с любой точки (наличие в отдельных случаях форшоков землетрясения). Таким образом, аномалии ЭМИ, выделенные в 1989 г., могут быть разложены по составляющим: афтершоку 28 апреля соответствует две группы аномалий с 27 апреля по 3 мая; афтершоку 7 мая – две группы аномалий с 4 по 11 мая; афтершоку 17 мая – с 12 по 25 мая. Характер изменения суточных аномалий ИЭМПЗ в 2005 и 2007 годах аналогичен вариациям ЭМИ 1989 г., например, серии аномалий 2 – 3 (Рис. 2) соответствуют основному событию с  $K=15,7$ .

Подтверждением сейсмотектонической природы аномалий ИЭМПЗ может служить отличительный характер их проявления в разных пунктах наблюдений. Например, аномальные изменения интенсивности (количества импульсов) в серии 1 и 4, 5 (см. Рис. 3) выделяются в отдельности по каждому пункту наблюдений, но проявляются в различные моменты времени. Следовательно, вследствие выше изложенного данные серии аномалий проявляются как отражение сейсмотектонических процессов. В противоположность этому, причиной аномалий серии 8, синфазно проявившихся на обоих пунктах, могут быть региональные либо глобальные источники возможно не тектонической природы.

### **Прогноз землетрясений. Обсуждение результатов и выводы**

В Южной Якутии впервые были зарегистрированы аномалии в геофизических полях, проинтерпретированные как предвестники сильного ( $K=16,5$ ) землетрясения, произошедшего 21 апреля 1989 г. [6]. Данному успеху предшествовал опыт 10-ти летних непрерывных

**ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ  
И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

стационарных и полигонных научных изысканий и близость прогностического полигона (48 км), на котором была установлена измерительная аппаратура к эпицентру проявившегося землетрясения.

Результаты анализа геофизических полей во время формирования очага землетрясения, в момент основного события, после этого землетрясения, моделирование режимов сейсмического и тектонического процессов, положили начало основополагающим принципам прогноза землетрясений в Южной Якутии.

Исследование изменений физико-динамических условий и геофизических полей, геохимической обстановки и других явлений, способных вызывать вариации полей не позволяет установить уверенные критерии или выявить устойчивые взаимно-однозначные связи вариаций геофизических полей с сейсмическими событиями. Это не означает, что возможностей для детерминированного краткосрочного прогноза не существует. Было бы правильно сказать, что на современном этапе развития науки и техники краткосрочный прогноз землетрясений затруднителен.

Изучение вариаций геофизических полей приводит к пониманию того, что непериодические изменения в полях зависят от типа очага, его физико-геологической, динамической и морфо-фациальной модели. Регистрируемые изменения - суть суммарные вариации полей, отражающие общие процессы формирования земной коры.

В составе суммарных вариаций имеются наложенные вариации, ответственные за формирование очага, которые находятся в прямой зависимости от вещественного состава, вмещающего очаговую зону. Необходимо построение физико-геологической (вещественной) модели т.к. физическое поле и его вариацию формирует вещество. Оно же, в основном, определяет распределение поля в пространстве.

Совместный анализ всех результатов наблюдений позволил сформулировать основополагающие принципы построения системы прогноза землетрясений, которые можно представить виде следующих ограничений и методических рекомендаций.

Геофизическим мониторингом геологической среды установлен пространственный параметр влияния сеймотектонических процессов на формирование аномалий физических полей в пределах активных тектонических структур северной границы Амурской плиты. Построенные модели физических полей [2-6] и сейсмического процесса [1, 8-10] укладываются в концепцию блокового строения геофизической среды [7]. По данному критерию прогнозирование места предстоящего сейсмического события не может быть определено точнее линейного размера неоднородности генерирующих структур.

Обобщение полученных результатов моделирования геофизических полей и процессов указывает на то, что, в конечном итоге, геофизическими методами контролируются

## **ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

геодинамические процессы в целом, а прогнозирование места отдельных землетрясений внутри динамической системы определяется с точностью до пространственных масштабов неоднородностей литосферы.

Разработанные принципы и методические приемы требуют более полного раскрытия ряда научных положений, их элементы должны быть увязаны между собой при возникновении других задач. Но одно бесспорно – каждый вид исследований должен быть четко ориентирован на определенную последовательность эксперимента и направлен на конечный результат – изучение закономерностей сейсмотектонических, геодинамических и физических процессов в земной коре, что, в конечном итоге, и приведет к разрешению основной задачи прогноза землетрясений.

### **Благодарности**

*Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания №5.1771.2014/К Министерства образования и науки.*

### **Список литературы**

1. Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М. Сейсмогеодинамика Алдано-Станового блока //Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 1. С. 5-17.
2. Трофименко С.В., Широков И.А., Анохина К. М. Результаты земноприливных наблюдений на территории Южной Якутии //Геофизические исследования в Якутии. Якутск: ЯГУ. 1995. С.55-63.
3. Трофименко С.В., Гриб Н.Н., Никитин В.М. Анализ вариаций естественного электромагнитного поля Земли в связи с сейсмичностью Южно-Якутского региона // Проблемы современной сейсмологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии: Материалы совещания. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2007. – Т.1. – С. 105–107.
4. Трофименко С.В., Гриб Н.Н., Никитин В.М., Муллаяров В.А. Результаты наблюдений за вариациями естественного электромагнитного поля Земли в Южной Якутии // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: Материалы IV международной конференции 14–17 августа 2007 г., с. Паратунка, Камчатской обл. – Петропавловск-Камчатский: Изд-во ИКИР ДВО РАН, 2007. – С. 453–458.
5. Трофименко С.В., Гриб Н.Н., Никитин В.М. Вариации электромагнитного поля как отражение сейсмотектонических процессов Олекма-Становой зоны //Известия Томского политехнического университета. Том314, №1, 2009. «Науки о Земле». С. 48 -53.
6. Трофименко С.В., Гриб Н.Н., Никитин В.М. Электромагнитный мониторинг переходной зоны сочленения Алданского щита и Становой складчатой системы // Шестой всероссийский симпозиум «Физика геосфер», 7-11 сентября 2009г., Владивосток. ТОИ ДВО РАН. 2009. С.256-259.
7. Трофименко С.В. Тектоническая интерпретация статистической модели распределений азимутов аномалий гравимагнитных полей Алданского щита // Тихоокеанская геология. 2010. Т. 29. № 3. С. 64–77.
8. Ovsyuchenko, A.N., Trofimenko, S.V., Marakhanov, A.V., Karasev, P.S., Rogozhin, E.A. . Source Zones of Strong Earthquakes in Southern Yakutia as Inferred from Paleoseismogeological Data //Izvestiya Physics of the Solid Earth. 2009.Vol. 45. No. 2. P. 101–117. DOI:10.1134/S1069351309020025.

***ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ  
И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ***

9. Ovsyuchenko, A.N., Trofimenko, S.V., Marakhanov, A.V. et. al. Detailed Geological–Geophysical Studies of Active Fault Zones and the Seismic Hazard in the South Yakutia Region //Russian Journal of Pacific Geology. 2009. Vol. 3. No. 4. P. 356–373. DOI: 10.1134/S1819714009040046

10. Ovsyuchenko A. N., Trofimenko S. V., Marakhanov A. V., Karasev P. S., Rogozhin E. A. Seismotectonics of the Transitional Region from the Baikal Rift Zone to Orogenic Rise of the Stanovoi Range //Geotectonics. 2010. Vol. 44. No. 1. P. 25–44. Doi:10.1134/S0016852110010036.

## **ВОЛНОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ПРОЯВЛЕНИЯХ СЕЙСМИЧНОСТИ СЕВЕРО-ВОСТОКА АМУРСКОЙ ПЛИТЫ**

<sup>1,2</sup>Трофименко С.В., <sup>2</sup>Быков В.Г.

<sup>1</sup>*Технический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, 677000, Нерюнгри, Кравченко, 16. e-mail: urovsky@yandex.ru*

<sup>2</sup>*Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН. 680000 Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65.*

Представлены результаты моделирования годовой динамики сейсмической активности в различных интервалах магнитуд северо-восточного сегмента Амурской микроплиты по статистике количества землетрясений в различных фазах изменения скорости вращения Земли. Методами ранговой корреляции для интервалов магнитуд  $2 \leq M < 4$  и  $4 \leq M < 5$  показана теснота связи между изменением сейсмической активности и периодам уменьшения-увеличения скорости вращения Земли. Для землетрясений с магнитудами  $5 \leq M < 6$  установлено пространственное группирование эпицентров в последовательность равноотстоящих в среднем через  $(3.5-4)^0$  однородных кластеров в направлении с востока на запад.

Ключевые слова: фазы активизации сейсмичности, скорость вращения Земли, пространственная модель сейсмических кластеров, деформационные волны, Амурская плита.

## **WAVE EFFECTS IN THE SPACE-TIME SEISMICITY NORTHEAST AMUR PLATE**

<sup>1,2</sup>Sergei V. Trofimenko, <sup>2</sup>Victor G. Bykov

<sup>1</sup>*Technical Institute (branch of) North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov in Neriungry, 16 Kravchenko Str. e-mail: urovsky@yandex.ru*

<sup>2</sup>*Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia*

The simulation results of annual dynamics of seismic activity in different intervals of magnitudes of the northeastern segment of the Amur microplate according to statistics the number of earthquakes in different phases of change in the Earth's rotation. Methods rank correlation magnitudes for the intervals  $2 \leq M < 4$  and  $4 \leq M < 5$  shows the relationship between the change in the tightness of the seismic activity and reduce periods, increasing the speed of rotation of the Earth. For earthquakes with magnitudes  $5 \leq M < 6$  established the spatial grouping of epicenters in the sequence of equally spaced an average of  $(3.5-4)^0$  homogeneous clusters in the direction from east to west.

Keywords: seismic activation phase, the rotational speed of the Earth's, seismic spatial model of clusters, deformation waves, Amur plate.

В пределах зон взаимодействия Евразийской литосферной плиты с Амурской микроплитой по результатам сейсмологического анализа выделяются сейсмические зоны, сформированные внутриконтинентальными землетрясениями с залеганием гипоцентров в пределах от 5 до 70 км.

Область данного исследования охватывает сегменты северной, северо-восточной и восточной границ Амурской микроплиты, западным ограничением которой выбрано Темулякит-Джелтулакское сгущение эпицентров землетрясений субдолготного простирания, контролируемая Темулякитскими (Олекминскими) системами разломов [10]. Северная граница трассируется полосой эпицентров землетрясений субширотного простирания от области меридиональных Темулякитских (Олекминских) разломов до Удской губы Охотского моря [7]. Центральная область сформирована динамическим взаимодействием кристаллических комплексов Алданского щита Сибирской платформы и Становой складчатой системы [8], где по данным инструментальных наблюдений выделена Олекмо-Становая сейсмическая зона (ОСЗ) в пределах  $56-58^{\circ}$  СШ и  $120-139^{\circ}$  ВД. Параллельно данной сейсмической зоне в полосе  $54-56^{\circ}$  СШ по сейсмологическим данным авторами [3] выделяется отдельная Тукурингра-Джагдинская сейсмическая зона (ТДЗ).

Для проведения анализа мы использовали данные каталогов Байкальского филиала Геофизической службы РАН (<http://www.seisbykl.ru>), Камчатского филиала Геофизической службы РАН (<http://www.emsd.ru>), а также данные, приведенные в сборниках «Землетрясения России» [1, 2] и региональный каталог Сахалинского филиала ГС РАН [4]. К рассмотрению приняты землетрясения с магнитудами  $2 \leq M \leq 6$ .

### **Результаты моделирования**

Для проверки возможной зависимости сейсмической активности от фазы изменения скорости вращения Земли был произведен расчет числа землетрясений в интервале магнитуд  $2 \leq M < 4$  при группировании событий на спадах, увеличении, минимумах и максимумах скорости. Суммирование числа землетрясений проводилось за январь-февраль-март+июль-август-сентябрь (1-3+7-9) и далее со сдвигом на один месяц. То есть всего получено шесть значений выборки числа землетрясений. Распределение количества землетрясений в данном интервале магнитуд показано на рисунке 1.

Расчет количества землетрясений по двум трехмесячным периодам в различных фазах движения показал, что максимум сейсмической активности проявляется в зимне-летний период, минимум – в весенне-осенний. То есть сейсмичность увеличивается при уменьшении изменения модуля скорости (Рис. 1), минимальна в периоды увеличения.

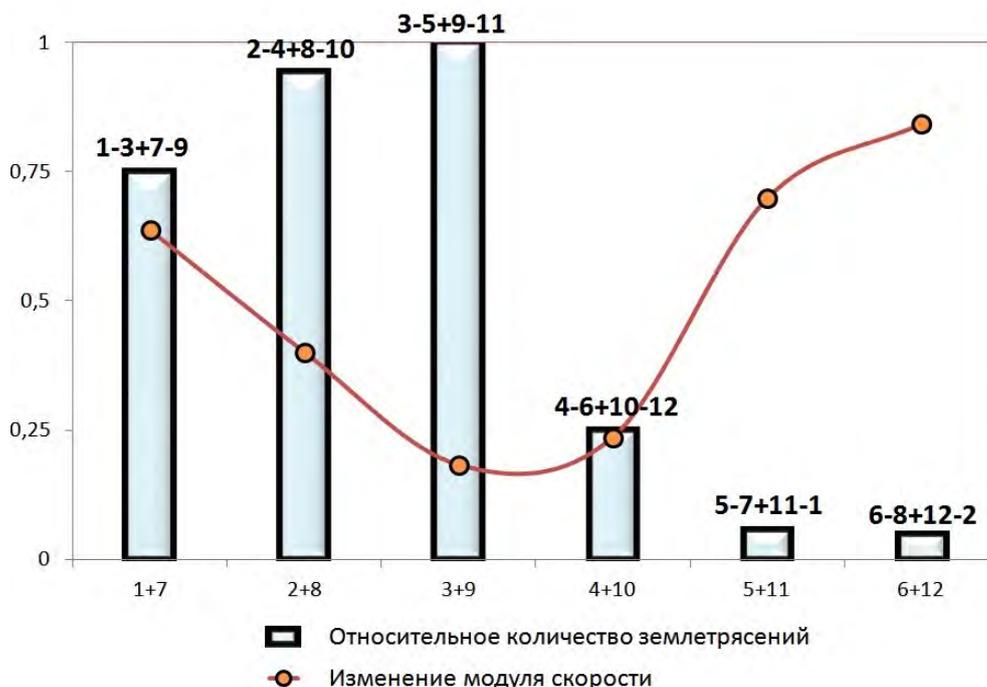


Рис. 1. Распределение относительного количества землетрясений по фазам изменения модуля скорости горизонтального смещения блока

Цифры горизонтальной оси диаграммы – цифровые идентификаторы месяца года. Цифры над гистограммой – месяцы года, для которых производится суммирование числа землетрясений: 1-3 - январь-февраль-март и т.д. Кривая на диаграмме – график изменения модуля горизонтальной скорости движения блока (изменения модуля скорости вращения Земли).

Для оценки тесноты связи двух процессов (скорость-сейсмичность) был произведен расчет коэффициента ранговой корреляции Спирмена,

$$\rho = 1 - 6 / (n^3 - n) \cdot \sum_{j=1}^n (R_j - S_j)^2, \quad (1)$$

где  $\sum_{j=1}^n (R_j - S_j)^2$  сумма квадратов разностей рангов скорости  $R_j$  и количества событий  $S_j$ , а  $n$  - число парных наблюдений.

В данном случае выборка модуля горизонтальной скорости представлена нормированными на единичный интервал значениями  $v_j = (0.637, 0.401, 0.183, 0.236, 0.699, 0.843)$ , а выборка числа землетрясений  $N_j = (1218, 1238, 1244, 1166, 1146, 1140)$ .

Соответственно, ранги, расположенные в порядке возрастания, для скорости равны  $R_j = (4, 3, 1, 2, 5, 6)$  и для количества событий -  $S_j = (4, 5, 6, 3, 2, 1)$ .

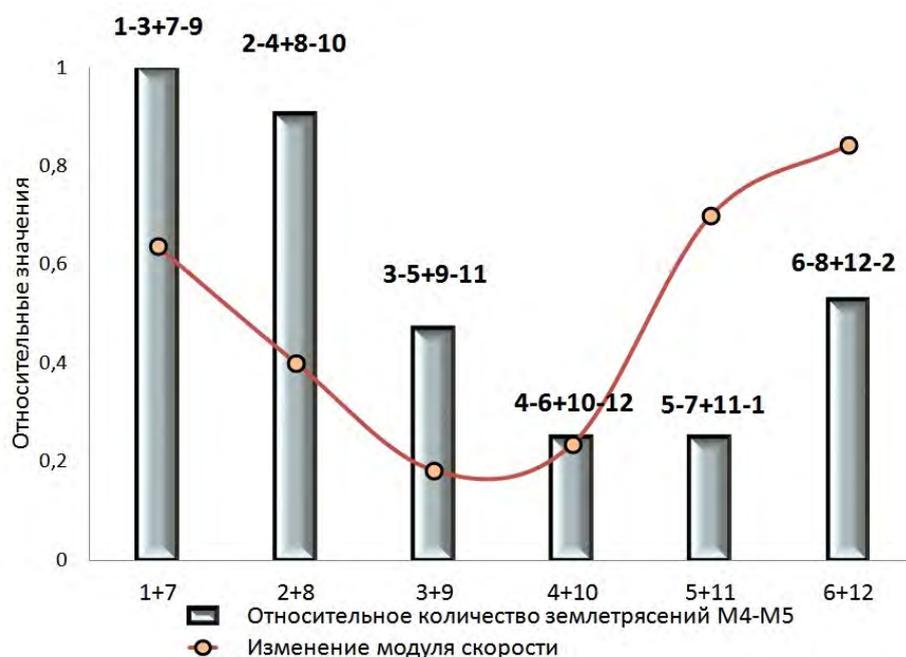
Для шести значений критическое значение коэффициента Спирмена для уровня значимости  $\alpha = 0.01$  равно  $\rho_\alpha = 0.943$  (при  $\alpha = 0.05$ ,  $\rho_{0.05} = 0.829$ ). На основе

**ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ  
И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

экспериментальных данных получено значение коэффициента, рассчитанное по формуле (1), равное  $\rho_{\text{exp}} = -0.829$ . Величина  $\rho_{\text{exp}}$  по модулю равна значению  $\rho_{0.05}$ , что указывает на обратную линейную зависимость двух процессов на уровне значимости  $\alpha = 0.05$ . При сдвиге кривой скорости на три интервала величина коэффициента становится равной  $\rho_{\text{exp}} = 0.829$ .

Здесь важно отметить следующее. Суммирование числа землетрясений производится по трем месяцам, следовательно, гистограмма числа землетрясений должна быть вынесена на середину интервала суммирования. То есть, сумма событий за месяцы (1-3+7-9) должна относиться к периоду (2+8) и т.д. Если сместить кривую модуля изменения скорости на интервал  $\Delta = -1$ , то коэффициент становится меньше  $\rho_{\text{exp}} = -0.77$ , а при двукратном смещении  $\Delta = -2$  практически равен нулю  $\rho_{\text{exp}} = -0.03$ . Фактически, скорость вращения Земли достигает максимума в конце января, а распределение сейсмических событий за трехмесячный цикл принято равномерным, то есть без учета весов моментов времени землетрясений от начала цикла. Это означает, что с погрешностью  $\pm 15$  сут. можно считать, что сейсмическая активность непосредственно следует за изменением модуля скорости вращения Земли и коэффициент корреляции достигает максимума при нулевом сдвиге фаз  $\rho_{\text{exp}}(\Delta = 0) \rightarrow \max$ .

**Корреляция между суммарным количеством землетрясений в интервале магнитуд  $4 \leq M < 5$  и изменением модуля скорости вращения Земли.** Распределение количества землетрясений в интервале магнитуд показано на рисунке 2. Методика построения аналогична построениям в интервале магнитуд  $2 \leq M < 4$ .



**ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ  
И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

Рис. 2. Распределение относительного количества землетрясений в интервале магнитуд

$4 \leq M \leq 5$  по фазам изменения модуля скорости горизонтального смещения блока

Обозначения аналогичны Рис. 1.

Расчет количества землетрясений по трехмесячным периодам в различных фазах изменения модуля скорости показал, что максимум сейсмической активности проявляется в зимне-летний период, минимум – в весенне-осенний. Однако в данном случае зависимость прямая и сейсмичность увеличивается при увеличении скорости (Рис.2), минимальна в периоды увеличения скорости и, практически, одинакова в минимумах и максимумах модуля изменения скорости вращения Земли. Непосредственным численным моделированием установлено, что максимум коэффициента корреляции Спирмена (1) достигается при нулевом сдвиге фаз при значениях модуля горизонтальной скорости, нормированными на единичный интервал  $v_j = (0.637, 0.401, 0.183, 0.236, 0.699, 0.843)$  и числа землетрясений  $N_j = (344, 321, 296, 301, 324, 349)$ . То есть для интервалов магнитуд  $4 \leq M < 5$  справедливо соотношение  $\rho_{\text{exp}}(\Delta = 0) \rightarrow \max$ . Однако значение коэффициента корреляции в данном интервале магнитуд выше чем для интервала  $2 \leq M < 4$ , то есть  $\rho_{\text{exp}}(4 \leq M < 5) > \rho_{\text{exp}}(2 \leq M < 4)$ .

Одна из причин уменьшения коэффициента корреляции для интервала магнитуд  $2 \leq M < 4$  может быть следствием миграции максимумов сейсмической активности (таблица 1, приложения). Например, если взять значения сумм по кластерам (1-1, 2-1, 3-1), то предложенная процедура дает значение коэффициента корреляции  $\rho_{\text{exp}}(\Delta = 0) = 0.943$ , а для кластеров (1-2, 2-2, 3-2) и (1-3, 2-3, 3-3)  $\rho_{\text{exp}} = (-0.257$  и  $-0.657)$ , соответственно.

**Пространственное распределение эпицентров землетрясений в интервале магнитуд  $5 \leq M < 6$  в двух фазах изменения модуля скорости вращения Земли.** Закономерное изменение сейсмической активности в интервалах магнитуд  $2 \leq M < 5$  (Рис. 1, 2) послужили основанием для построения пространственной модели распределения эпицентров землетрясений с магнитудами от  $M=5$  до  $M=6$ , при условии группирования их по фазовому признаку изменения модуля скорости вращения Земли. То есть, землетрясения в интервалах магнитуд  $5 \leq M < 6$ , объединяются в две группы по фазам уменьшения и увеличения модуля скорости. При увеличении модуля скорости происходит сжатие земной коры, при уменьшении - растяжение [6]. Таким образом, можно считать, что землетрясения сгруппированы по двум фазам «сжатие-расширение» Земли.

На рисунке 3 представлено пространственное распределение эпицентров землетрясений в данных интервалах магнитуд. Землетрясения сгруппированы по периодам из 6-ти месяцев «январь, февраль, март+июль, август, сентябрь» (фаза расширения), которые обозначены

**ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ  
И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

темными кружками, и «апрель, май, июнь+октябрь, ноябрь, декабрь» (фаза сжатия) - светлыми кружками. В первом приближении группы землетрясений в одинаковой фазе изменения модуля скорости разделены прямыми линиями.

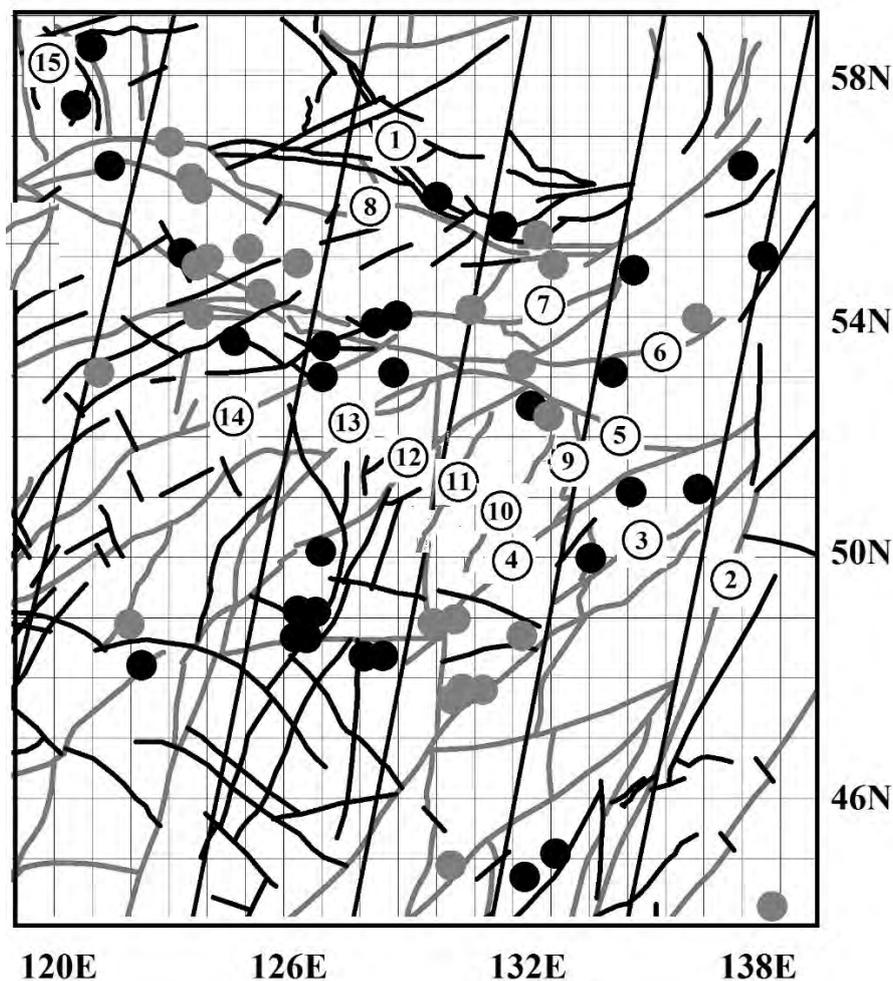


Рис 3. Пространственное распределение эпицентров землетрясений с магнитудами от  $M=5$  до  $M=6$  северо-восточного сегмента Амурской.

Цифрами 1-4 обозначены области группирования землетрясений в фазах «сжатия - расширения» земной коры. Темные кружки - землетрясения в фазе замедления вращения Земли (расширения Земли), светлые - в фазе ускорения (сжатие Земли). Вынесены основные известные разломы различной кинематики из системы Станового Структурного шва и системы Тан Лу.

Разломы: 1 - Тыркандинский; 2 - Центрально-Сихотэ-Алинский; 3 - Ишу-Харпинский; 4 - Хинганский; 5- Пауканский; 6 - Тугурский; 7 - Северо-Тукурингский; 8 - Становой; 9 - Тастахский; 10 - Мельгинский; 11 - Западно-Туранский; 12 - Селемджинский; 13 - Буссе-Норский; 14 - Синлунгоу; 15 - Темулякитский.

В первую (восточную) зону попадает шесть землетрясений фазы «расширения» и одно фазы «сжатия», то есть соотношение землетрясений с разными фазами равно (6-1). В тектоническом отношении данный сейсмический кластер объединяет в основном разломы восточного замыкания зоны Тан-Лу северо-восточного простирания, фрагментарно расчлененные меридиональным трансформным Тастахским разломом второго порядка. В северной части кластер объединяет восточные окончания субширотных Тугурского и Северо-

**ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ  
И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

Тукурингского разломов, к зоне динамического влияния которых приурочено пять землетрясений.

Три землетрясения произошли в блоке, ограниченном Ишу-Харпинским, Хинганским и Тастахским разломами. Два землетрясения в южной части кластера можно отнести к зоне динамического влияния Тастахского трансформного разлома.

Для второй зоны землетрясений соотношение событий с разными фазами равно (12-2). Данный сейсмический кластер объединяет разломы системы Тан-Лу и субширотные структуры Станового краевого шва. За исследованный период активизации подверглись все структуры обеих систем разломов. Три группы землетрясений в южной, центральной и северной частях кластера зарегистрированы в блоках, ограниченных разломами различной кинематики и простираения.

Для третьей и четвертой зон землетрясений с разными фазами равно – (12-0) и (11-3), соответственно. Тектоническая расслоенность данных кластеров весьма мозаична. Здесь присутствуют разломы северо-восточной, северо-западной, субширотной и меридиональной ориентировки. Все системы разломов неоднократно активизировались, что отражается в группировании эпицентров землетрясений. Группа землетрясений из пяти событий в центральной части третьего кластера произошли в блоке, ограниченном сопряженной системой Буссе-Норского и Синлунгоу разломов северо-восточной ориентировки и Пауканского и Северо-Тукурингского субширотных разломов. В южной части данного кластера шесть событий контролируются разломами меридионального, субширотного и диагонального заложения. Компактная группа землетрясений в центральной части четвертого кластера зарегистрирована в блоке, ограниченном Северо-Тукурингским разломом и Становой системы разломов.

Западный кластер граничит с восточным замыканием Байкальской рифтовой зоны. Здесь зарегистрировано три землетрясения в фазе "расширения" в зоне динамического влияния меридиональных Темулякитских разломов и субширотного Северо-Станового разлома.

Из общих закономерностей можно отметить, что ширина зон группирования землетрясений в разных фазах изменения модуля скорости вращения Земли составляет в среднем  $(3.5-4)^0$ . Эта величина равна половине пространственного цикла сейсмической активности, на котором максимумы сейсмической активности замещаются минимумами, для интервалов магнитуд от  $M=2$  до  $M=4$ , протяженность которого равна в среднем  $\lambda = 7.26^0$  и, идентифицирована как длина деформационной волны «сжатие-расширение» [5].

Таким образом, полученные результаты моделирования свидетельствуют о не случайном группировании землетрясений в различные периоды изменения скорости вращения

**ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ  
И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

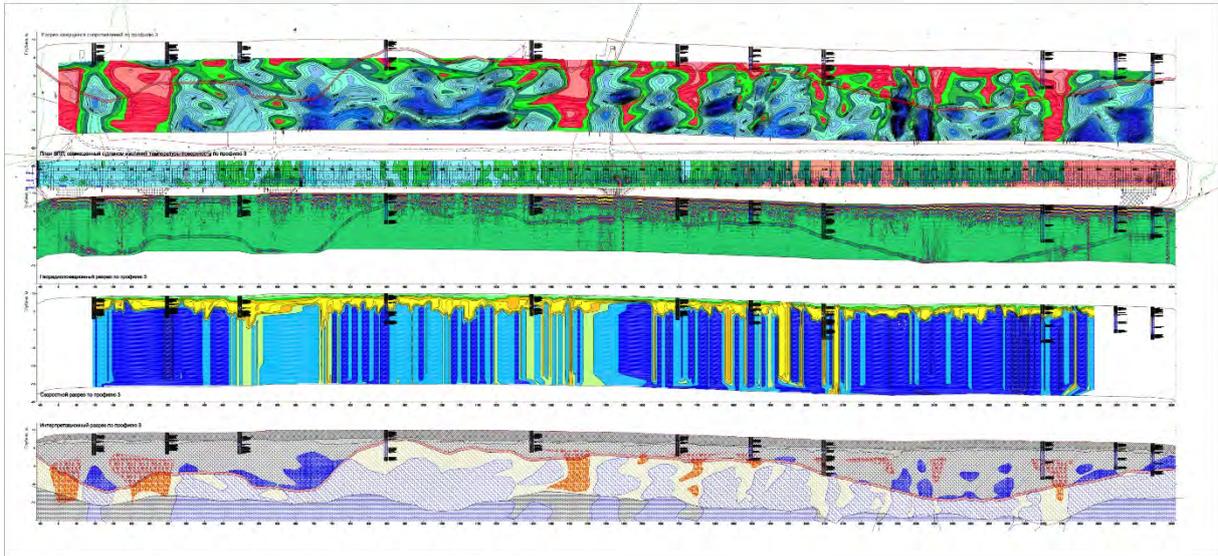
Земли, а отражают реальные геофизические процессы, связанные с движением блоков земной коры [10], которые являются следствием воздействия на геологическую среду деформационных волн.

**Благодарности**

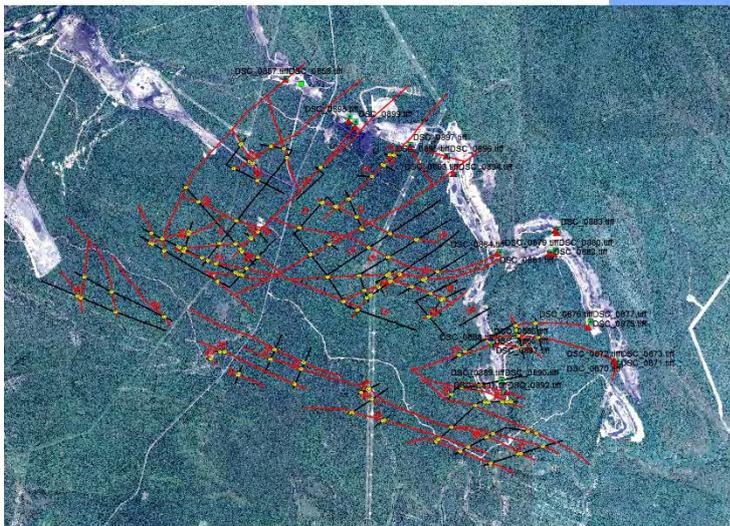
*Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания №5.1771.2014/К Министерства образования и науки России и по программе «Дальний Восток», грант Дальневосточного отделения РАН 15-И-2-014.*

**Список литературы**

1. Землетрясения России в 2004-2008 гг. Обнинск: ГС РАН, 2007-2010.
2. Землетрясения Северной Евразии. Обнинск: ГС РАН, 1997-2004.
3. Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М. Сейсмогеодинамика Алдано-Станового блока // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 1. С. 5-17.
4. Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905-2005. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104с.
5. Трофименко С. В., Быков В.Г., Меркулова Т.В. Миграция сейсмической активности в зоне конвергентного взаимодействия Амурской и Евразийской литосферных плит // Вулканология и сейсмология. 2015. № 3. С. 66-80.
6. Фридман А.М., Клименко А.В., Поляченко Е.В., Фридман М.В. О связи глобальной сейсмической активности Земли с особенностями ее вращения. // Сейсмология и вулканология. 2005. № 1. С. 67-74.
7. Ovsyuchenko, A.N., Trofimenko, S.V., Marakhanov, A.V., Karasev, P.S., and Rogozhin, E.A. (A). Source Zones of Strong Earthquakes in Southern Yakutia as Inferred from Paleoseismogeological Data //Izvestiya Physics of the Solid Earth. 2009. Vol. 45. No. 2. PP. 101–117. DOI:10.1134/S1069351309020025.
8. Ovsyuchenko, A.N., Trofimenko, S.V., Marakhanov, A.V. et. al. Detailed Geological–Geophysical Studies of Active Fault Zones and the Seismic Hazard in the South Yakutia Region. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2009, Vol. 3, No. 4, pp. 356–373. DOI: 10.1134/S1819714009040046
9. Ovsyuchenko A. N., Trofimenko S. V., Marakhanov A. V., Karasev P. S., and Rogozhin E. A. Seismotectonics of the Transitional Region from the Baikal Rift Zone to Orogenic Rise of the Stanovoi Range. *Geotectonics*, 2010, Vol. 44, No. 1, pp. 25–44, Doi: 10.1134/S0016852110010036.
10. Trofimenko S.V., Bykov V.G., 2014. The model of crustal block movement in the South Yakutia geodynamic testing area based on GPS data. *Russian Journal of Pacific Geology*, V. 8. #4. pp. 247-255, doi: 10.1134/S1819714014040071.



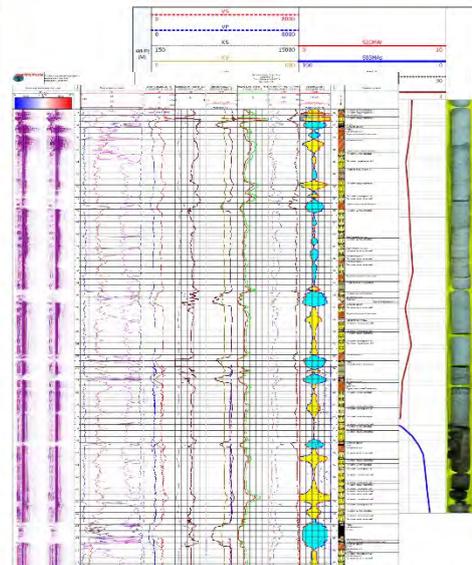
Наземные геофизические исследования в условиях криолитозоны



Выделение малоамплитудных тектонических нарушений и моделирование месторождений полезных ископаемых



Геофизические исследования скважин



Международная научно-практическая конференция «Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности» —  
Постатейно

**Результаты оперативного геологического обследования сильнейших землетрясений России в начале XXI века | [Статья](#)**

Овсяченко А.Н., Рогожин Е.А.

DOI:10.18411/svfu1230915-01

*Секция I. АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ И СЕЙСМОАКТИВНАЯ СРЕДА*

**Магнитотеллурический мониторинг напряженно-деформированного состояния среды (для территории центрального Тянь-Шаня) | [Статья](#)**

[Баталева Е.А.](#), [Баталев В.Ю.](#)

DOI:10.18411/svfu1230915-02

**Четвертичные травертины Курайской зоны разломов (Горный Алтай): литотипы, петрографические и геохимические характеристики | [Статья](#)**

[Ряполова Ю.М.](#), Деев Е.В., Сокол Э.В., Кох С.Н., Русанов Г.Г.

DOI:10.18411/svfu1230915-03

**Идентификация деформационного эффекта по отношениям активностей  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  в подземных водах на профиле Иркутск–Байкал | [Статья](#)**

[Рассказов С.В.](#), Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Воднева Е.Н., Семинский А.К.

DOI:10.18411/svfu1230915-04

**Сейсмичность, сейсмотектоника, распространение возмущений от очаговых зон и прогноз землетрясений (на примере исследований в Карпатском регионе Украины) | [Статья](#)**

[Назаревич А.В.](#), Назаревич Л.Е.

DOI:10.18411/svfu1230915-05

**Разломообразование в земной коре Уулаанбаатарского геодинамического полигона (Монголия): результаты исследования радоновой и сейсмической активности | [Статья](#)**

[Семинский К.Ж.](#), Дэмбэрэл С., Бобров А.А., Мунгунсурен Д.

DOI:10.18411/svfu1230915-06

**Внутреннее строение Тыркандинской shear зоны (Якутия) | [Статья](#)**

[Мельников А.И.](#), Смелов А.П., Имаев В.С., Тимофеев В.Ф., Кравченко А.А.

DOI:10.18411/svfu1230915-07

**Развитие сейсмотектонических исследований в Южной Якутии | [Статья](#)**

Козьмин Б.М.

DOI:10.18411/svfu1230915-08

**Определения очаговых параметров землетрясений Южной Якутии по поверхностным волнам | [Статья](#)**

Середкина А.И., Козьмин Б.М.  
DOI:10.18411/svfu1230915-09

**Диагностика метанестабильного состояния сейсмоактивного разлома по данным деформационного мониторинга | [Статья](#)**

Борняков С.А., Мирошниченко А.И., Салко Д.В.  
DOI:10.18411/svfu1230915-10

## ***Секция II. ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА***

**Новые данные о затухании сейсмических волн в литосфере и верхней мантии северо-восточного фланга Байкальской рифтовой системы | [Статья](#)**

[Добрынина А.А.](#), [Саньков В.А.](#), [Чечельницкий В.В.](#)  
DOI:10.18411/svfu1230915-11

**Развитие петромагнитной базы данных Восточной Сибири | [Статья](#)**

[Константинов К.М.](#), Забелин А.В., Константинов И.К., Яковлев А.А., Киргуев А.А.  
DOI:10.18411/svfu1230915-12

**Сейсмолинементы Восточного Приамурья по анализу сейсмичности в 1968-2009 гг | [Статья](#)**

[Меркулова Т.В.](#)

DOI:10.18411/svfu1230915-13

**Байкальская рифтовая система: признаки нелинейной самоорганизующейся системы | [Статья](#)**

[Ключевский А.В.](#)

DOI:10.18411/svfu1230915-14

**Группы землетрясений и группирующаяся сейсмичность в литосфере Байкальской рифтовой системы | [Статья](#)**

Ключевская А.А., Демьянович В.М., Ключевский А.В., Зуев Ф.Л., Какоурова А.А.

DOI:10.18411/svfu1230915-15

**Некоторые результаты сейсмомониторинга по данным Селенгинской локальной сети | [Статья](#)**

Цыдыпова Л.Р., Тубанов Ц.А., Толочко В.В., Базаров А.Д.

DOI:10.18411/svfu1230915-16

**Графики повторяемости слабых землетрясений вблизи Бурейской ГЭС до и после наполнения водохранилища | [Статья](#)**

Харитонов М.Е., Колотова Л.Г., Рябинкин К.С.

DOI:10.18411/svfu1230915-17

**Природа сейсмичности Восточной Чукотки и прилегающего шельфа | [Статья](#)**

Курткин С.В., Седов Б.М., Мяки К.Д.

DOI:10.18411/svfu1230915-18

**Вейвлет анализ сейсмического воздействия на 9-ти этажное здание серии 135 |**

[Статья](#)

Базаров А.Д., Черных Е.Н., Цыдыпова Л.Р.

DOI:10.18411/svfu1230915-19

**Сеймотектонический контроль эпицентральных полей северо-восточного фланга Байкальского рифта и Олекмо-Становой сейсмической зоны | [Статья](#)**

Имаев В.С., Имаева Л.П., Гриб Н.Н., Колодезников И.И., Никитин В.М.

DOI:10.18411/svfu1230915-20

***Секция III. ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ. ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ. НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ. ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ***

**Спектральный состав микросейсм до и после слабых землетрясений Тан Лу |**

[Статья](#)

Колотова Л.Г., Харитонов М.Е., Пупатенко В.В., Рябинкин К.С.

DOI:10.18411/svfu1230915-21

**Изучение современных и древних деформаций в зонах разломов Монголии | [Статья](#)**

Серебренников С.П., Батсайхан Ц.

DOI:10.18411/svfu1230915-22

**Синтез исходного сигнала для прогноза сейсмических воздействий на основания линейных сооружений с учетом деградации мерзлоты | [Статья](#)**

Брыжак Е.В., Ескин А.Ю., Шагун А.Н.

DOI:10.18411/svfu1230915-23

**Основы и результаты инженерно-сейсмологического прогноза для территорий восточного фланга Байкальской рифтовой зоны и Южной Якутии | [Статья](#)**

Джурик В.И.

DOI:10.18411/svfu1230915-24

**Защита социально-экономической инфраструктуры Восточной Сибири от природных опасностей | [Статья](#)**

Леви К.Г., Козырева Е.А., Мирошниченко А.И., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А.

DOI:10.18411/svfu1230915-25

**Техногенные землетрясения и прогноз обрушений на Жезказганском месторождении | [Статья](#)**

Герман В.И.

DOI:10.18411/svfu1230915-26

**Экспериментальная оценка сейсмического действия массовых взрывов в разрезе «Нерюнгринский» на охраняемые объекты** | [Статья](#)

Черных Е.Н.

DOI:10.18411/svfu1230915-27

**Наведенная сейсмичность, инициированная буровзрывными работами на разрезе «Нерюнгринский»** | [Статья](#)

Гриб Г.В., Колодезников И.И., Трофименко С.В., Никитин В.М.

DOI:10.18411/svfu1230915-28

#### ***Секция IV. СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ***

**Уточнённая карта сейсмического районирования территории Республики Саха (Якутия)** | [Статья](#)

Петров А.Ф., Козьмин Б.М., Шибаяев С.В., Тимиршин К.В.

DOI:10.18411/svfu1230915-29

**Добротность земной коры центральной части Байкальской рифтовой зоны по данным станций «Хурамша» и «Фофоново»** | [Статья](#)

Герман Е.И., Тубанов Ц.А., Предеин П.А.

DOI:10.18411/svfu1230915-30

**Вариации концентраций растворенного радона в подземных водах Южного Прибайкалья и прогноз времени возникновения землетрясений** | [Статья](#)

Семенов Р.М., Лопатин М.Н.

DOI:10.18411/svfu1230915-31

**Новые геолого-геофизические данные для оценки сейсмической опасности столицы Монголии** | [Статья](#)

Смекалин О.П., Чипизубов А.В., Имаев В.С., Дэмбэрэл С., Баттогтох Д., Гриб Н.Н., Сясько А.А., Качаев А.В.

DOI:10.18411/svfu1230915-32

**Сейсмолинеаменты и разрушительные землетрясения в российской части Балтийского щита: новые решения для последних 13 тысяч лет** | [Статья](#)

Никонов А.А., Шварев С.В.

DOI:10.18411/svfu1230915-33

#### ***Секция V. ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И АРХЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ***

**Неизвестные древние землетрясения в Алабаш-Конуроленской внутригорной впадине (Южное Прииссыккулье, Киргизия)** | [Статья](#)

Турова И.В., Деев Е.В., Корженков А.М., Лужанский Д.В., Гладков А.С.

DOI:10.18411/svfu1230915-34

**Современная геодинамика Прибайкалья** | [Статья](#)

Чипизубов А.В.

DOI:10.18411/svfu1230915-35

**Новый подход к оценке сейсмического потенциала и сейсмической опасности Черноморского побережья Кавказа (по археосейсмическим материалам)** | [Статья](#)

Никонов А.А.

DOI:10.18411/svfu1230915-36

**Следы древних землетрясений в Яломанском грабене (Горный Алтай)** | [Статья](#)

Лобова Е.Ю., Деев Е.В., Зольников И.Д.

DOI:10.18411/svfu1230915-37

***Секция VI. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ***

**Изучение сейсмического режима Приморья (с позиций строительства)** | [Статья](#)

Федюк Р.С., Мочалов А.В., Тимохин А.М., Муталибов З.А., Ильинский Ю.Ю.

DOI:10.18411/svfu1230915-38

***Секция VII. ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ***

**Теория подобия пространственной и временной структуры сейсмичности** | [Статья](#)

Герман В.И.

DOI:10.18411/svfu1230915-39

**Геофизические исследования на прогностических полигонах Южной Якутии.**

**История и современность** | [Статья](#)

Трофименко С.В., Гриб Н.Н.

DOI:10.18411/svfu1230915-40

**Волновые эффекты в пространственно-временных проявлениях сейсмичности северо-востока Амурской плиты** | [Статья](#)

Трофименко С.В., Быков В.Г.

DOI:10.18411/svfu1230915-41

**МАТЕРИАЛЫ**  
**Международной конференции**  
**«Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности»**

*23-25 сентября 2015 г.*

Печатается в авторской редакции

**Технический редактор *Л.В. Николаева***

Подписано в печать 24.08.2015. Формат 60x84/16.  
Бумага тип. №2. Гарнитура «Таймс». Печать офсетная.  
Печ. л. 19,9. Уч.-изд. л. 24,9. Тираж 100 экз. Заказ 294.  
Издательство ТИ (ф) СВФУ, 678960, г. Нерюнгри, ул. Кравченко, 16.

---

Отпечатано в МУП «Нерюнгринская городская типография».  
г. Нерюнгри, ул. Северная, 8.