

Всероссийская научная конференция с международным участием

Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений



27-28 ноября 2019, ИТПЗ РАН, Москва

All-Russian Scientific Conference with International Participation

Modern methods of seismic hazard assessment and earthquake prediction



27-28 November 2019, IEPT RAS, Moscow

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики
Российской академии наук

К 30-летию ИИПЗ РАН

Всероссийская научная конференция с международным участием

Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений

27-28 ноября 2019 г., Москва

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ И ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ

Под редакцией Некрасовой А.К.

Москва
2019

Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г. Москва: ИТПЗ РАН, 2019. – 119 с.

В сборнике публикуются тезисы докладов и программа Всероссийской научной конференции с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», которая состоялась 27-28 ноября 2019 г. в Институте теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (Москва). В конференции принимали участие приглашенные докладчики из Армении, Италии, КНР, Франции, ЮАР, ведущие сотрудники институтов и научных центров РФ, а также студенты, аспиранты и молодые ученые, чья деятельность связана с проблемами оценки сейсмической опасности, включая прогноз землетрясений, и смежными областями наук о Земле.

Ответственный редактор:

к.ф.-м.н. Некрасова А.К.

Компьютерная верстка:

Прохорова Т.В., Бутова Л.А., Мацеевская О.А.

Дизайн обложки:

д.ф.-м.н. Кособоков В.Г.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатель: к.ф.-м.н. Некрасова А.К.

Заместитель председателя: Тимофеева В.А.

Члены комитета:

Винберг Ф.Э., Каберов В.Х., Ливинский А.И., Никитина М.А.,
к.ф.-м.н. Скоркина А.А., к.т.н. Фомочкина А.С., Щепалина П.Д.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель: чл.-корр. РАН Соловьев А.А.

Заместитель председателя: д.ф.-м.н. Шебалин П.Н.

Члены комитета: академик РАН Адушкин В.В. (ИДГ РАН), чл.-корр. РАН Трубицын В.П. (ИФЗ РАН), проф. Панца Д.Ф. (иностраный член РАН, Академия деи Линчеи, Италия), д.ф.-м.н. Горшков А.И., д.ф.-м.н. Желиговский В.А., д.ф.-м.н. Завьялов А.Д., (ИФЗ РАН), к.г.н. Карапетян Д.К. (Института Геофизики и Инженерной Сейсмологии им. А. Назарова НАН, Республика Армения), д.ф.-м.н. Кособоков В.Г., проф. Пересан А. (Национальный Институт Океанографии и Экспериментальной Геофизики, Италия), д.ф.-м.н. Подвигина О.М., д.ф.-м.н. Родкин М.В.

Конференция проведена при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
Проект № 19-05-20035

ОГЛАВЛЕНИЕ

Абубакарова Э.А. Геофизические поля, глубинное строение и сейсмичность Терско-Каспийского прогиба	9
Баранов А.А., Шебалин П.Н., Баранов С.В. Оценка воздействия морских приливов на активность афтершоков в сейсмически активных районах	11
Бурмин В.Ю., Шемелева И.Б., Аветисян А.М., Казарян К.С. Землетрясения Кавказа	14
Воробьева И.А., Mandal P., Горшков А.И. Блоковая модель Гималайской дуги: моделирование сейсмического цикла, дефицита проскальзывания и сильнейших землетрясений	16
Воробьева И.А., Narteau C., Шебалин П.Н., Соловьев А.А. Картирование межплитового сцепления в зонах субдукции по вариациям магнитудно-частотного распределения сейсмичности	18
Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В. Связь интенсивности сейсмичности Центральной Азии с современной геодинамикой региона	20
Гвишиани А.Д. Системный анализ геофизических данных: big data, open data and fair data	22
Герман В.И. Единая теория подобия структуры сейсмичности и ее применение для анализа каталогов землетрясений	23
Герман В.И. Прогноз обрушений на рудниках по данным сейсмического мониторинга на примере Жезказганского медного месторождения	25
Гитис В.Г., Дерендяев А.Б. Обобщение метода минимальной области тревоги для прогноза магнитуд землетрясений	27
Глухов А.Н., Седов Б.М. Активные разломы и оценка сейсмичности Кулу-Тенькинского района (Магаданская область) по результатам дистанционного зондирования	29
Гравиров В.В., Кислов К.В. Способ фильтрации шумовой составляющей сейсмических сигналов, вызванных вариациями температуры снаружи и внутри сейсмических приборов	31
Гравиров В.В., Лиходеев Д.В., Кислов К.В. Отдельные вопросы разработки и применения прецизионных электронных термодатчиков сверхвысокой точности	33
Григорян В.Г., Карапетян Дж.К. Карты сейсмической опасности территории Армении: этапы развития, новые нормативные карты ОСР РА	35
Григорян А.Г., Лиходеев Д.В. Изучение геодинамических процессов и выявление предвестников сильных ($M \geq 5$) землетрясений с помощью вариаций компонентов вектора переменного геомагнитного поля на примере Армении, Северного Кавказа и Италии	38
Дергач П.А., Логинов Г.Н. Алгоритм детектирования сигналов от слабых локальных землетрясений на основе сверточной нейронной сети: пример обработки реальных данных и сравнение с классическим методом	40
Дзобоев Б.А., Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Белов И.О. Вариативный метод ЕРА и оценка сейсмической опасности	42
Желиговский В.А. Всё, что надо знать о геодинамо, за 15 минут	44
Жунусова А.Ж., Бектурганова Б.Б., Досайбекова С.К., Садыкова А.Б. Состояние сейсмичности Северного Тянь-Шаня Казахстана за 2015-2019 гг.	46

Завьялов А.Д., Перетокин С.А. От сейсмической опасности к сейсмической безопасности: прогноз землетрясений, сейсмическое районирование и сейсмостойкое строительство.....	47
Кислов К.В., Гравиров В.В. Раннее предупреждение о землетрясении: современное состояние и перспективы	50
Козырев А.А., Жукова С.А. Комплексная оценка влияния метеорологических и гидрогеологических факторов на сейсмическую активность Хибинского массива при ведении горных работ	53
Козырев А.А., Журавлева О.Г. Комплексный подход к оценке сейсмической опасности при ведении горных работ	55
Королева А.О., Ивлева О.А., Родкин М.В., Викулина М.А. Свидетельства постледниковой сейсмостектонической активности западных Хибин	56
Ленькова Е.Н. Сезонные компоненты наведённой сейсмичности в областях Чиркейского и Нурекского водохранилищ	58
Ливинский А.И., Новикова О.В., Горшков А.И. Определение характерных геолого-геофизических признаков мест локализации крупных месторождений металлов в Алтае-Саянском регионе с помощью алгоритмов распознавания образов.....	60
Михайлов В.О., Киселева Е.А., Тимошкина Е.П., Тимофеева В.А., Шапиро Н.М., Смирнов В.Б., Хайретдинов С.А. Изучение косейсмических и постсейсмических процессов по комплексу наземных и спутниковых данных	62
Мурыськин А.С., Шулаков Д.Ю., Скоркина А.А. Спектральный подход к оценке регистрационных возможностей систем сейсмомониторинга разной конфигурации на примере Урала и Кентернбери.....	64
Некрасова А.К., Кособоков В.Г. Общий закон подобия для землетрясений: оценка сейсмической опасности и ассоциированных рисков	66
Никитина М.А., Родкин М.В. Сейсмичность зоны субдукции западной части Аляски, связь с современной вулканической активностью и глубинным флюидным режимом.....	68
Новиков Р.Г. Глобальная единственность в пассивной обратной задаче гелиосейсмологии.....	70
Панас Н.М. Анализ волнового поля сейсмических сигналов, зарегистрированных станцией Лопухинка	71
Писаренко В.Ф., Родкин М.В., Рукавишникова Т.А. Стабильная модификация закона повторяемости землетрясений и перспективы её применения в сейсморайонировании	73
Подвигина О.М. Гетероклинические циклы в геофизике и гидродинамике	74
Родкин М.В. Обобщенная окрестность сильного землетрясения, приложение к физике сейсмического процесса и прогнозу землетрясений	76
Середкина А.И. Глубинное строение верхней мантии Арктики по данным поверхностных волн	77
Середкина А.И., Голубев В.А., Филиппов С.В. Температурный режим литосферы Северного Прибайкалья по геомагнитным, геотермическим и сейсмологическим данным	79
Улубиева Т.Р., Маматкулова З.С. Современная система сейсмического мониторинга Таджикистана	81

Фомочкина А.С., Букчин Б.Г. Проблемы определения параметров очагов землетрясений по записям поверхностных волн	83
Хажаяев Р.Р. Спектральные характеристики высотного здания МГУ при метеорологических и сейсмических воздействиях	85
Хачикян Г.Я., Садыкова А.Б., Инчин А.С. Метод оценки максимально возможной магнитуды землетрясения по параметрам главного геомагнитного поля.....	87
Шебалин П.Н., Баранов С.В., Корчак П.А., Жукова С.А. Закон продуктивности в условиях техногенной сейсмичности.....	89
Шебалин П.Н. Новые закономерности в сейсмическом режиме	91
Щепалина П.Д., Кособоков В.Г., Некрасова А.К. Лунно-солнечные приливы и сейсмичность Прибайкалья.....	92
Яроцкий Г.П. Геологические и геофизические элементы системы «тектоника-сейсмичность» Хаилинского высокомагнитудного центра корякского пояса (СВ Азии)	95
Gorshkov A., Novikova O., Gaudemer Y., Mandal P., Hassan H. Identifying potential earthquake sources in the continental environments.....	97
Ismail-Zadeh A.T. 30+years of mathematical and scientific excellency in earthquake prediction and seismic risk assessments	98
Kijko A., Smit A. Seismic hazard analysis – in 50 years perspective	99
Liu T., Kossobokov V.G. The pre- and post- deformations of the great earthquakes from GPS and seismic data.....	100
Lyubushin A.A. Earth tremor coherence field.....	102
Panza G.F. NDSHA: a new paradigm for reliable seismic hazard assessment. Part 1 – Time independent	103
Panza G.F. NDSHA: a new paradigm for reliable seismic hazard assessment. Part 2 – Time (in)dependent	105
Peresan A., Kossobokov V., Nekrasova A., Panza G.F. Forecasting earthquakes and related ground shaking: testing and validation issues.....	107
Peresan A., Varini E., Zhuang J. Earthquake clusters identification and characterization by different methods	109
Wu Z.L. and the Coordination Group for Earthquake Forecast of CEA_IEF. Scientific products of earthquake forecast for seismic disaster resilience: practice in China.....	111
Wu Z.L. and the Team of the Field Investigation of the 2013 Lushan Earthquake. Ideas and spirits of forensic seismology applied to earthquake forecasting	112
Программа конференции.....	113

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ, ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ И СЕЙСМИЧНОСТЬ ТЕРСКО-КАСПИЙСКОГО ПРОГИБА

Абубакарова Э.А.^{1,2}

¹ *Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова
РАН, г. Грозный, Россия*

² *Грозненский государственный нефтяной технический университет имени
акад. М.Д. Миллионщикова, г. Грозный, Россия
E-mail: eliza_ggni@mail.ru*

(стендовый доклад)

Глубинное строение исследуемой территории наиболее информативно проявляется в геофизических полях. В структуре складчатых систем, платформенных областей, нефтегазоносности и сейсмической активности немаловажное значение имеют разрывные нарушения. Региональная закономерность геологического строения выражается характерными отрицательными значениями силы тяжести в аномальном гравитационном поле, магнитное поле региона слабо дифференцированно характеризуется положительными значениями аномалий. Разрывные нарушения в магнитном и гравитационном полях отображаются рядом признаков, к числу которых относятся большие градиенты гравитационного и магнитного полей, полосы интенсивных положительных магнитных и гравитационных аномалий, цепочки максимумов силы тяжести, цепочки округлых положительных магнитных аномалий, резкая смена общего характера магнитного и гравитационного полей и др. [Керимов, 2009; Abubakarova, 2018; Абубакарова, 2019].

Территория центральной части Терско-Каспийского прогиба является районом с высокой сейсмической активностью. Здесь и ранее были зарегистрированы землетрясения, обусловленные главным образом интенсивной разработкой нефтяных и газовых месторождений. Длительная разработка месторождений привела к нарушениям равновесного состояния геологической среды со значительным изменением пластовых условий и соответственно к развитию опасных геодинамических процессов [Гайсумов, 2015].

Исследование сейсмичности и глубинного строения региона базируется на анализе результатов интерпретации гравитационных и магнитных полей с использованием современной компьютерной технологии статистического и спектрально-корреляционного анализа данных «Коскад 3D». Результаты обработки геофизических полей были сопоставлены с эпицентрами землетрясений изучаемого региона, которые позволили наблюдать пространственное рассеивание очагов землетрясений. Сравнительный анализ геофизических полей с эпицентрами сильных землетрясений показывает, что эпицентры сейсмической активности укладываются в большей степени в областях регионального и локального минимумов, которые в основном приурочены к высокоградиентным зонам поля силы тяжести. При сопоставлении магнитного поля и распределения эпицентров землетрясений было установлено, что они тяготеют к областям положительных магнитных аномалий.

По результатам анализа и интерпретации данных были выделены тектонические зоны, соответствующие разломным структурам исследуемой территории, области простираения и пересечения разрывных нарушений, характеризующиеся высокой современной геодинамической активностью. Отмечается приуроченность эпицентров землетрясений к градиентным зонам региональных и локальных минимумов силы тяжести.

Литература

- Абубакарова Э.А.* Выделение разрывных нарушений Терско-Каспийского прогиба по результатам интерпретации потенциальных полей с использованием компьютерной технологии "Коскад 3D" // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Сборник научных трудов по материалам 46-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского. Пермь: Горный институт Уральского отделения РАН, 2019. С. 11–16.
- Гайсумов М.Я., Абубакарова Э.А., Ахматханов Р.С., Бадаев С.В.* Разломная тектоника, геофизические поля и сейсмичность Чеченской Республики // Геодинамика, вулканизм, сейсмичность и экзогенные геологические процессы природного и техногенного характера на Кавказе. Сборник трудов конференции. Владикавказ: Владикавказский научный центр РАН, 2015. С. 22–30.
- Керимов И.А., Гайсумов М.Я., Абубакарова Э.А.* Геофизические поля и разломная тектоника Терско-Каспийского прогиба // Геодинамика. Глубинное строение. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей. Пятое научные чтения памяти Ю.П. Булашевича, 06–10 июля 2009 г. Материалы конференции. Екатеринбург, 2009. С.226–230.
- Abubakarova E.A., Akhmatkhanov R.S., Badaev S.V., Chimaeva Kh.R.* Demonstration of disjunctive dislocations of Terskokaspiyskiy trough in potential fields using Koskad 3D software // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. С. 082001. DOI: 10.1088/1755-1315/194/8/082001

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ МОРСКИХ ПРИЛИВОВ НА АКТИВНОСТЬ АФТЕРШОКОВ В СЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ РАЙОНАХ

Баранов А.А.^{1,2}, Шебалин П.Н.¹, Баранов С.В.³

¹ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики
РАН, г. Москва, Россия

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

³ Кольский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» г. Апатиты, Россия

E-mail: baranov@ifz.ru

(устный доклад)

В работе получены количественные оценки воздействия морских приливов с изменением уровня сейсмической активности. Получение таких оценок для афтершоков сильных землетрясений вблизи Камчатки и Новой Зеландии является целью данного исследования. Здесь мы рассматриваем влияние на сейсмичность только морских приливов, так как их воздействие сильнее, чем воздействие земных приливов. Соответственно, мы рассматриваем лишь землетрясения с эпицентрами в океане. Существенным отличием от большинства предыдущих исследований является исследование в качестве факторов влияния не фаз приливов, а высоты морского прилива и ее производной.

Мы рассмотрели 16 последовательностей афтершоков от землетрясений вблизи берегов Камчатки с $M \geq 6$ (рис. 1) и 6 последовательностей афтершоков для Новой Зеландии (рис. 2).

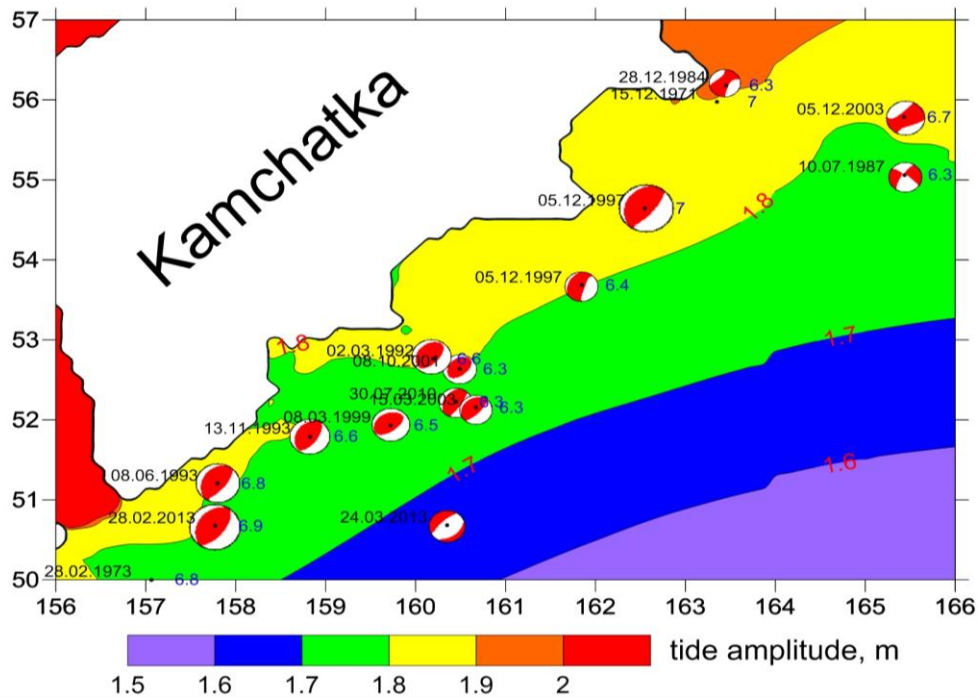


Рис. 1. Карта основных толчков с $M \geq 6$ вблизи Камчатки, 1971–2013 гг., афтершоки которых использованы для анализа. Цветами показана максимальная амплитуда морского прилива в данной точке. Фокальные механизмы основных толчков взяты из глобального каталога СМТ (Global Centroid-Moment-Tensor catalog, [Ekström, 2012]), в случае отсутствия в каталоге СМТ данных о землетрясении эпицентр обозначался звездочкой

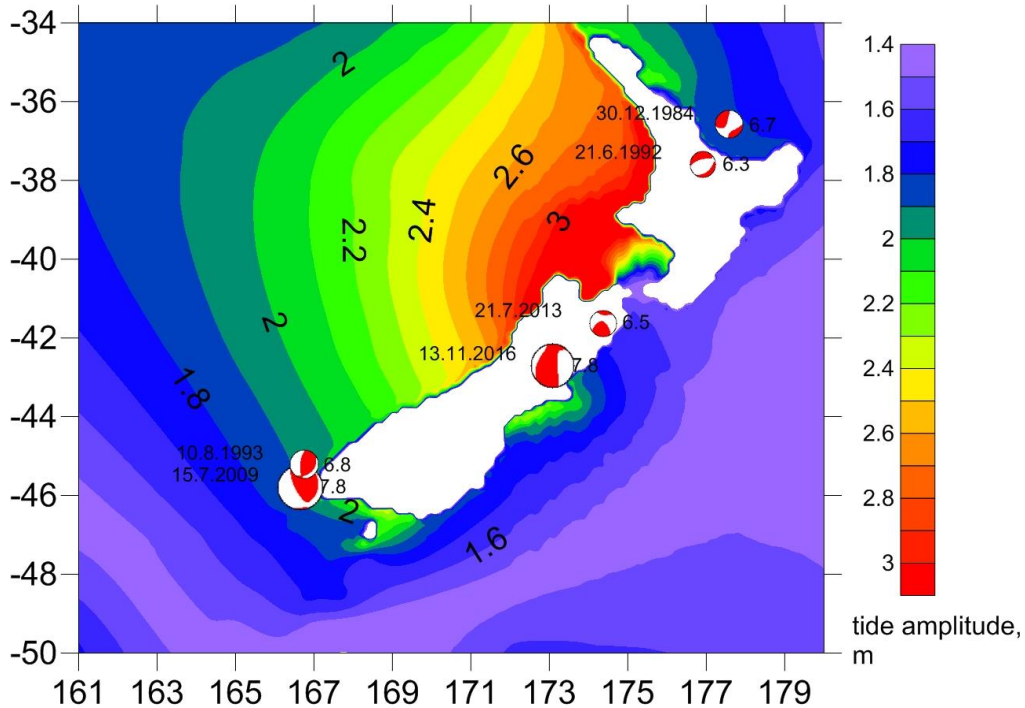


Рис. 2. Карта основных толчков с $M \geq 6$ вблизи Новой Зеландии, 1984–2016 гг., афтершоки которых использованы для анализа. Обозначения те же, что и для рис. 1

Отдельно мы рассмотрели неглубокие фоновые землетрясения вдоль побережья Камчатки. В качестве базовой модели интенсивности афтершоков мы использовали закон Омори-Утсу; фоновая сейсмичность моделировалась равномерным по времени распределением. В обоих случаях использовалось фактическое распределение по пространству.

Высоты морских приливов оценивались с помощью модели FES 2004 [Lyard, 2006]. Степень изменения активности относительно базовой модели в зависимости от высоты приливной волны и от ее производной по времени оценивались с помощью метода дифференциального выигрыша по вероятности (differential probability gain). В качестве главного практического результата оценены усредненные функции дифференциального вероятностного выигрыша повторяемости афтершоков для обоих рассмотренных факторов. Эти оценки могут быть использованы для расчетов сейсмической опасности афтершоков после сильных землетрясений с учетом воздействия приливов.

Результаты проведенного анализа показывают устойчивую тенденцию возрастания повторяемости афтершоков в периоды больших скоростей спадания приливной волны. Для фоновых событий характерно увеличение повторяемости во время отливов с большой амплитудой приливной волны. Различие основных факторов влияния приливов на афтершоки и на фоновую сейсмичность позволяют предположить, что воздействие приливов на афтершоки имеет скорее характер прямого динамического инициирования событий при

больших скоростях деформации, тогда как воздействие на фоновые события имеет скорее статический характер.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-17-00093).

Литература

Lyard F., Lefèvre F., Letellier Th., Francis O. Modelling the global ocean tides: Modern insights from FES2004 // *Ocean Dynamics*. 2006. V. 56. P. 394–415. DOI: 10.1007/s10236-006-0086-x

Ekström G., Nettles M., Dziewonski A.M. The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2012. V. 200–201. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.pepi.2012.04.002

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ КАВКАЗА

Бурмин В.Ю.¹, Шемелева И.Б.¹, Аветисян А.М.², Казарян К.С.²

¹ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

² *Институт геофизики и инженерной сейсмологии НАН Армении, г. Гюмри, Армения*

E-mail: vburmin@yandex.ru

(устный доклад)

Полученные ранее результаты по определению положения очагов коровых землетрясений на Кавказе со всей очевидностью говорят о том, что используемые в практике сейсмической службы методы определения гипоцентров землетрясений не позволяют достаточно точно лоцировать сейсмические события. Кроме этого, привлечение только одной скоростной колонки или одного набора годографов для определения гипоцентров землетрясений для всех станций сети также не способствует точному определению положения гипоцентров землетрясений. Для того чтобы определять положение очагов землетрясений с высокой точностью необходимо иметь достаточно детальное представление о глубинном строении земной коры и верхней мантии в изучаемом регионе. При этом, желательно брать сведения о строении региона не по данным о землетрясениях, а по данным других наблюдений, например, по данным глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ). На основе сейсмологических бюллетеней Кавказа за 1970-2015 гг. произведено переопределение координат гипоцентров землетрясений Кавказа. Общая картина распределения гипоцентров землетрясений в земной коре Кавказа существенно отличается от распределения гипоцентров по каталогу.

Показано также, что на Кавказе кроме коровых землетрясений имеют место и достаточно глубокие мантийные землетрясения. Этот факт, помимо непосредственных определений, подтверждается данными, опубликованными в каталогах и бюллетенях Кавказа. Вопрос существования очагов глубоких землетрясений на Кавказе является чрезвычайно важным как с точки зрения геодинамики, так и с точки зрения сейсмической опасности и сейсмического районирования региона. Ранее считалось, что на Кавказе могут происходить землетрясения, глубина которых не превышает 150 км. Существование более глубоких землетрясений на Кавказе ранее в научной литературе не обсуждалось, однако дискуссия по этому вопросу в последние годы в ряде работ нашла своё отражение. Наличие очагов глубоких землетрясений на Кавказе существенно меняет наши взгляды на строение и геотектонику региона. Очевидно, что коровые землетрясения являются доминирующими в сейсмичности региона, но очевидно также, что мантийные землетрясения вносят в неё существенный вклад. То, что их доля в общем количестве землетрясений гораздо меньше, чем доля коровых землетрясений, может говорить о том, что кора более жесткая и хрупкая, чем верхняя мантия.

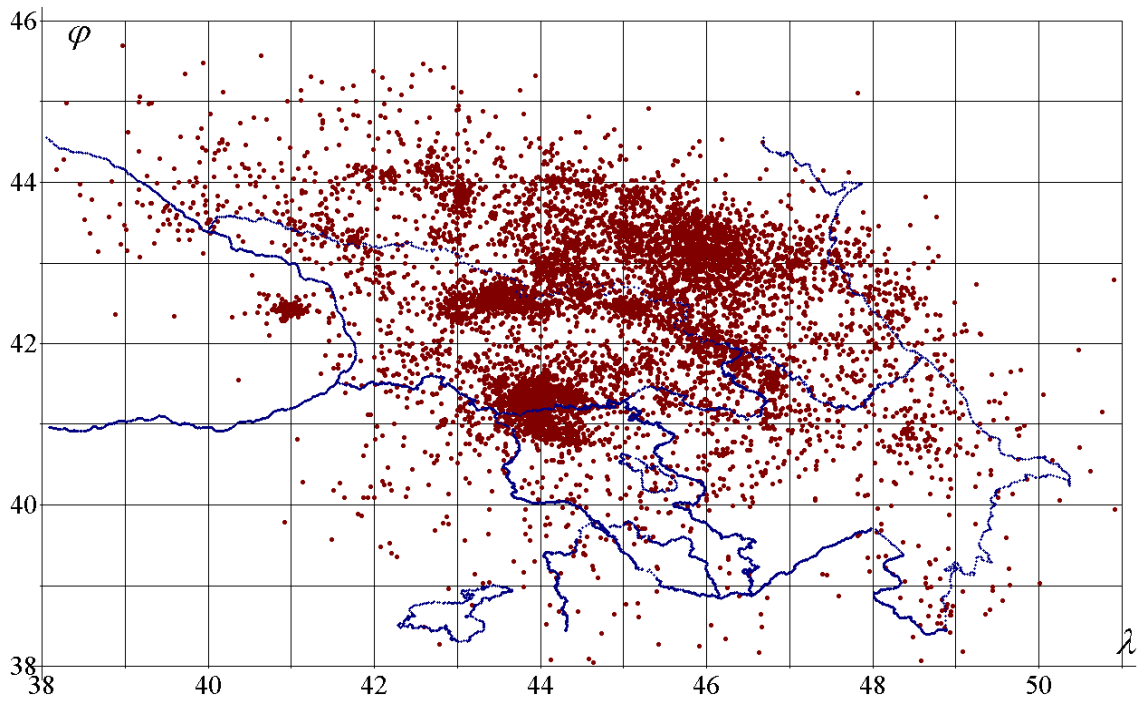


Рис. 1. Распределение эпицентров землетрясений Кавказа за период 1971-2015 гг.

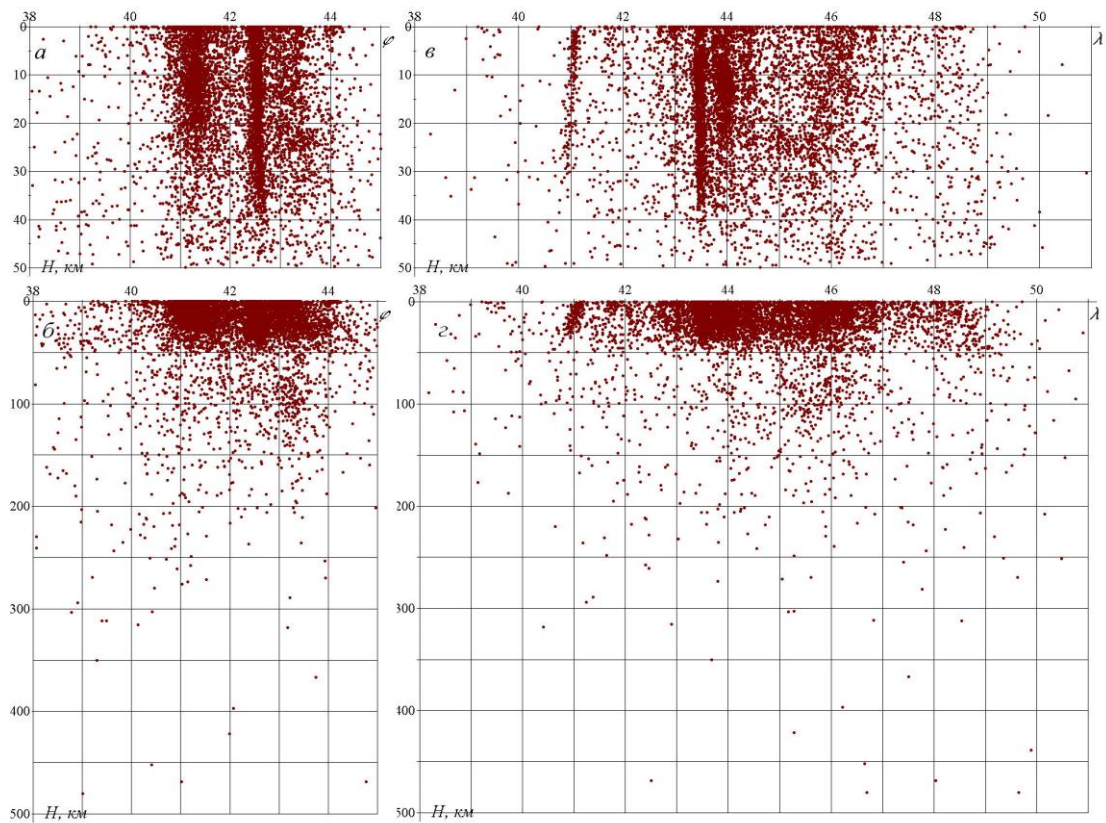


Рис. 2. Распределение гипоцентров землетрясений Кавказа в долготной (а) и (б) и широтной (в) и (г) плоскостях за период 1971-2015 гг.

БЛОКОВАЯ МОДЕЛЬ ГИМАЛАЙСКОЙ ДУГИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ЦИКЛА, ДЕФИЦИТА ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ И СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Воробьева И.А.¹, Mandal P.², Горшков А.И.¹

¹ *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики
РАН, г. Москва, Россия*

² *CSIR-National Geophysical Research Institute, Hyderabad, India
E-mail: vorobiev@mitp.ru*

(устный доклад)

Мы изучаем долгосрочные закономерности накопления деформации и возникновения сильных землетрясений в Гималаях [Vorobieva, 2017] с помощью блоковой модели динамики литосферы (BAFD) [Soloviev, 2003]. Блоковая структура разработана на основе морфоструктурной схемы Гималайской дуги [Gorshkov, 2012], скорости тектонических движений выбраны в соответствии с данными GPS [Vernant, 2014], а реологические свойства разломов варьируются в зависимости от коэффициента межплитового сцепления [Stevens, 2015]. Модель воспроизводит базовые свойства геодинамики и сейсмичности Гималайской дуги: график повторяемости, продуктивность, типичные механизмы очага. Локализация сильных синтетических землетрясений и их максимальные магнитуды соответствуют данным об инструментальных и исторических сильных землетрясениях. Мы моделируем эволюцию дефицита проскальзывания и сейсмические циклы для различных сегментов дуги Гималаев. Длительность цикла варьируется от 700 до 2100 лет, что хорошо согласуется с результатами палеосейсмологических исследований [Kondo, 2008; Kumar, 2010; Bollinger, 2014; Le Roux-Mallouf, 2016]. Результаты моделирования показывают, что накопление дефицита проскальзывания зависит не только от скорости сжатия, реологии и структуры, но и от динамики окружающих блоков земной коры. В частности, тектонические движения микроплит плато Шиллонг и бассейн Ассам играют значительную роль в геодинамике и сейсмичности блока Бутан, приводя к пониженной сейсмической активности и повышенной скорости асейсмических смещений. Таким образом, мы делаем вывод, что локальная сейсмичность является следствием динамики всей региональной системы разломов и блоков, а не только динамики индивидуального разлома. Моделирование BAFD предсказывает максимальную сейсмическую опасность в центральной секции Гималаев, между очагами сильных землетрясений Кангра 1905 г. и Горха (Gorkha) 2015 г., и относительно меньшую опасность в Кашмире и Ассаме.

Литература

- Bollinger L., Sapkota S.N., Tapponnier P., Klinger Y., Rizza M., Van der Woerd J., Tiwari D.R., Pandey R., Bitri A., Bes de Berc S. Estimating the return times of great Himalayan earthquakes in eastern Nepal: Evidence from the Patu and Bardibas strands of the Main Frontal Thrust // *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*. 2014. V. 119. P. 7123–7163. DOI: 10.1002/2014JB010970
- Gorshkov A., Parvez I.A., Novikova O. Recognition of Earthquake-Prone Areas in the Himalaya: Validity of the Results // *International Journal of Geophysics*. 2012. V. 2012. Article 419143. DOI: 10.1155/2012/419143

- Kondo H., Nakata T., Akhtar S.S., Wesnousky S., Sugito N., Kaneda H., Tsutsumi H., Khan A.M., Khattak W., Kausar A.B.* Long recurrence interval of faulting beyond the 2005 Kashmir earthquake around the northwestern margin of the Indo-Asian collision zone // *Geology*. 2008. V. 36 (9). P. 731–73. DOI: 10.1130/G25028A.1
- Kumar S., Wesnousky S.G., Jayangondaperumal R., Nakata T., Kumahara Y., Singh V.* Paleoseismological evidence of surface faulting along the northeastern Himalayan front, India: Timing, size, and spatial extent of great earthquakes // *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*. 2010. V. 115. Article B12422. DOI: 10.1029/2009JB006789
- Le Roux-Mallouf R., Ferry M., Ritz J-F., Berthet T., Cattin R., Drukpa D.* First paleoseismic evidence for great surface-rupturing earthquakes in the Bhutan Himalayas // *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*. 2016. V. 121. P. 7271–7283. DOI: 10.1002/2015JB012733
- Soloviev A., Ismail-Zadeh A.* Models of dynamics of block-and fault systems // *Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction / Eds. V. Keilis-Borok, A. Soloviev*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2003. P. 71–139.
- Stevens V.L., Avouac J.P.* Interseismic coupling on the main Himalayan thrust // *Geophysical Research Letters*. 2015. V. 42. P. 5828–5837. DOI: 10.1002/2015GL064845
- Vernant P., Bilham R., Szeliga W., Drukpa D., Kalita S., Bhattacharyya A.K., Gaur V.K., Pelgay P., Cattin R., Berthet T.* Clockwise rotation of the Brahmaputra valley about India: Tectonic convergence in the Eastern Himalaya, Naga Hills, and Shillong 34 Plateau // *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*. 2014. V. 119 (8). P. 6558–6571. DOI: 10.1002/2014JB011196
- Vorobieva I., Mandal P., Gorshkov A.* Block-and-fault dynamics modeling of the Himalayan frontal arc: Implications for seismic cycle, slip deficit, and great earthquakes // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2017. V. 148. P. 131–141. DOI: 10.1016/j.jseaes.2017.08.033

КАРТИРОВАНИЕ МЕЖПЛИТОВОГО СЦЕПЛЕНИЯ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ ПО ВАРИАЦИЯМ МАГНИТУДНО-ЧАСТОТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ

Воробьева И.А.¹, Narteau С.², Шебалин П.Н.¹, Соловьев А.А.¹

¹ *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики
РАН, г. Москва, Россия*

² *Institut de Physique du Globe de Paris, Paris, France
E-mail: vorobiev@mitp.ru*

(устный доклад)

Тектонические движения на границах плит земной коры проявляются как землетрясения и/или как непрерывная медленная деформация (крип). В большинстве случаев эти сейсмические и асейсмические процессы сосуществуют, поэтому зарегистрированная сейсмичность и геодезические измерения являются двумя дополнительными наборами данных, которые документируют текущую деформацию вдоль активных тектонических структур. В большинстве случаев распределение землетрясений по размерам следует закону Гуттенберга-Рихтера, так что график повторяемости представляет собой прямую. Однако в зонах повышенного асейсмического проскальзывания (крипа) график может значительно отклоняться от прямой. Нелинейность графика повторяемости землетрясений системы разломов Сан Андреас коррелирует со скоростью крипа [Vorobieva, 2016]. В диапазоне больших магнитуд наклон графика повторяемости увеличивается с ростом скорости крипа, тогда как в диапазоне малых магнитуд систематической зависимости не наблюдается. Загиб графика повторяемости интерпретируется как недостаток сильных землетрясений: быстрый крип уменьшает вероятность возникновения большого сейсмического разрыва.

На основе связи формы графика повторяемости со скоростями неупругих деформаций мы определяем геометрию предполагаемых областей сцепления в зонах субдукции (Камчатка, Япония) [Vorobieva, 2019]. В областях повышенного асейсмического проскальзывания наблюдается нарушение линейности графика повторяемости, связанное с дефицитом сильных событий, а области повышенного сцепления океанической и континентальной плит характеризуются избытком сильных событий и обратным загибом распределения. Результаты картирования величины загиба магнитудно-частотного распределения сейсмичности хорошо согласуются с выделением зон сцепления по спутниковым геодезическим данным [Zobin, 2001; Hashimoto, 2012; Iinuma, 2016; Nishimura, 2018] и инверсии мареограмм [Johnson, 1999; Bourgeois, 2018].

Литература

- Vorobieva И.А., Соловьев А.А., Шебалин П.Н. Картирование межплитового сцепления в Камчатской зоне субдукции по вариациям магнитудно-частотного распределения сейсмичности // ДАН. 2019. Т. 484. № 4. С. 478–481. DOI: 10.31857/S0869-56524844478-481
- Bourgeois J., Pinegina T.K. The 1997 Kronotsky earthquake and tsunami and their predecessors, Kamchatka, Russia // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2018. V. 18. P. 335–350.

- Hashimoto C., Noda A., Matsu'ura M.* The Mw 9.0 northeast Japan earthquake: total rupture of a basement asperity // *Geophys. J. Int.* 2012. V. 189 P. 1–5. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2011.05368.x
- Johnson J.M., Satake K.* Asperity Distribution of the 1952 Great Kamchatka Earthquake and its Relation to Future Earthquake Potential in Kamchatka // *Pure Appl. Geophys.* 1999. V. 154. P. 541–553.
- Iinuma T., Hino R., Uchida N., Nakamura W., Kido M., Osada Y., Miura S.* Seafloor observations indicate spatial separation of coseismic and postseismic slips in the 2011 Tohoku earthquake // *Nature communications.* 2016. Article 13506. DOI: 10.1038/ncomms13506
- Nishimura T., Yokota Y., Tadokoro K., Ochi T.* Strain partitioning and interplate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from Global Navigation Satellite System and Global Positioning System-Acoustic data // *Geosphere.* 2018. V. 14(2). P. 535–551. DOI: 10.1130 /GES01529.1
- Vorobieva I., Shebalin P., Narteau C.* Break of slope in earthquake size distribution and creep rate along the San Andreas Fault system // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 6869–6875. DOI: 10.1002/2016GL069636
- Zobin V.M., Levina V.I.* The Rupture Process of the Mw 7.8 Cape Kronotsky, Kamchatka, Earthquake of 5 December 1997 and Its Relationship to Foreshocks and Aftershocks // *Bulletin of the Seismological Society of America.* 2001. V. 91. P. 1619–1628.

СВЯЗь ИНТЕНСИВНОСТИ СЕЙСМИЧНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ С СОВРЕМЕННОЙ ГЕОДИНАМИКОЙ РЕГИОНА

Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В.

*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики
РАН, г. Москва, Россия
E-mail: gatinsky@gmail.com*

(устный доклад)

Центральная Азия входит в число наиболее высоко сейсмичных внутриконтинентальных регионов Мира, однако распределение эпицентров землетрясений на её площади крайне неравномерно. Большинство из них приурочено к «треугольнику» с вершиной у оз. Байкал и с основанием вдоль Гималаев. При более детальном анализе устанавливается связь самых интенсивных землетрясений с активными разломами, которые часто служат границами коровых и корово-мантийных блоков Центральной Азии [Гатинский, 2004]. Отметим, что стороны упомянутого «треугольника», входящего в состав Центрально-Азиатской транзитной зоны (ЦАТЗ), в первом приближении, совпадают на СЗ с границей Северо-Евразийской литосферной плиты, а на востоке – с георазделом меридионального простирания, проходящим между 102°–104°в.д. На остальной территории региона Центральной Азии эпицентры присутствуют значительно реже, чем в пределах ЦАТЗ. Фокальные механизмы, по данным СМТ, отвечают преобладанию сжатий в надвигах и сдвигов в ЦАТЗ, растяжений в рифтах и сдвигов с растяжениями к востоку от неё.

Восточная граница ЦАТЗ вдоль геораздела 102°–104° совпадает с резким градиентом мощности коры, возрастающей к западу от 43–51 до 55–70 км. Здесь же отмечены высокие значения коэффициента Пуассона до 0.29–0.31 [Wang, 2015], отвечающие возрастанию поперечного сжатия на западных границах блоков ЮВ Китая и Ордоса. Повышение уровня сейсмической энергии к западу от геораздела наиболее отчётливо видно на границе блока Баянхар с ЮВ Китаем, где после землетрясения Венчуан энергия в межблоковой зоне возросла с $1.13 \cdot 10^{15}$ J до $9.25 \cdot 10^{16}$ J [Gatinsky, 2011], что сопоставимо с энергией западно-тихоокеанских зон субдукции. Флексура между Баянхаром и ЮВ Китаем отвечает надвигу к ЮВ верхней и средней коры [Crustal structure of China..., 2001]. В литосфере Тибета установлены низкоскоростные, предположительно, частично расплавленные слои на глубинах 20–30 км [Hu, 2012], вдоль которых под давлением Индостанского индентора происходит деляминация, срыв верхней части коры и перемещение её вокруг восточного Гималайского синтаксиса [Gan, 2007]. Все эти данные отвечают высокой тектонической активности и повышенной сейсмичности в пределах ЦАТЗ.

Возрастание интенсивности сейсмичности с преобладанием надвигов и сдвигов происходит также на СЗ ЦАТЗ со сменой направления векторов GPS от СЗ на ЮВ к западу и юго-западу от Байкала, а также в центральных частях транзитной зоны на границах блоков и на юго-западе и западе её в Гималаях и на Памире [Gatinsky, 2011]. Следовательно, под действием давления Индостанского индентора в ЦАТЗ преобладает геодинамический режим транспрессии. В то же время к востоку от геораздела развиты многочисленные кайнозойские

рифты и впадины, ограниченные сбросами и сдвигами с растяжением, в том числе вдоль крупного разлома Танлу [Гатинский, 2017], что указывает на существование здесь противоположного предыдущему режиму трансенсии со значительно меньшей интенсивностью проявления сейсмических событий по сравнению с западной зоной.

Смена геодинамического режима к востоку от геораздела может быть связана с продолжением в верхней мантии глубоко погруженного тихоокеанского слэба, доказанного детальным анализом мантийной томографии [Chen, 2017]. Его стагнация и постепенная дегидратация сопровождаются поднятием к поверхности горячего и влажного материала, что приводит к возрастанию теплового потока в литосфере и к проявлениям кайнозойского вулканизма преимущественно основного состава [Gatinsky, 2019]. Таким образом, изменение интенсивности сейсмичности на западе и востоке Центральной Азии связано, в первую очередь, со сменой геодинамических режимов в пределах этого региона.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 18-05-00160.

Литература

- Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В., Рундквист Д.В.* Геодинамика и сейсмичность восточной части Центральной Азии // ДАН. 2017. Т. 472 (3). С. 333–336. DOI: 10.7868/S0869565217030173
- Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В.* Геодинамика Евразии – тектоника плит и тектоника блоков // Геотектоника. 2004. Т. 1. С. 3–20.
- Chen Ch., Zhao D., Tian Y., Wu Sh., Hasegawa A., Lei J., Park J.-H., Kang I.-B.* Mantle transition zone, stagnant slab and intraplate volcanism in Northeast Asia // *Geophysical Journal International*. 2017. V. 209. С. 68–85.
- Crustal Structure of China from Deep Seismic Sounding Profiles // URL: <https://earthquake.usgs.gov/data/crust/china.php> (accessed 2011).
- Gan W.-J., Zhang P.-Z., Shen Z.-K., Niu Zh., Wang M., Wan Y., Zhou D., Cheng J.* Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. Article B08416. DOI: 10.1029/2005JB004120
- Gatinsky Yu.G., Prokhorova T.V.* The main geodivider of Central Asia into geophysical fields and anomalies // *Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”*. Beijing, PRC, April 29, 2019. Participant’s reports in English. 2019. Part 2. P. 92–102.
- Gatinsky Yu., Rundquist D., Vladova G., Prokhorova T.* Up-to-date geodynamics and seismicity of Central Asia // *International Journal of Geosciences*. 2011. V. 2 (1). P. 1–12. DOI: 10.4236/ijg.2011.21001
- Hu J., Yang H., Xu X., Wen L., Li G.* Lithospheric structure and crust–mantle decoupling in the southeast edge of the Tibetan Plateau // *Gondwana Research*. 2012. V. 22 (3–4). P. 1060–1067. DOI: 10.1016/j.epsl.2011.03.034
- Wang Ch.-Yo., Yang W.-C., Wu J.-P., Ding Zh.-F.* Study on the lithospheric structure and earthquakes in North-South Tectonic Belt // *Chinese Journal of Geophysics – Chinese Edition*. 2015. V. 58 (11). P. 3867–3901. DOI: 10.6038/cjg20151101

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ: BIG DATA, OPEN DATA AND FAIR DATA

Гвишиани А.Д.

Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия

E-mail: a.gvishiani@gcras.ru

(устный доклад)

В 19 веке развитие математики мотивировалось открытием физических законов. Возник математический анализ и высшая алгебра. В 20 веке математика вышла на первый план как инструмент моделирования в многочисленных прикладных задачах. Фокусируясь на одном из свойств многообразных процессов природы и общества, математическое моделирование позволило описать основополагающие свойства явлений в отрыве друг от друга. Это породило функциональный анализ, кибернетику, информатику.

Геофизики построили тектоническую, сейсмологическую, гравитационную, магнитную и электромагнитную модели Земли. Нехватка исходных данных не дала возможность построить в 20 веке комплексную модель Земли, учитывающую перечисленные геофизические поля.

Сегодня мы живем в мире больших данных, требующих новой математики для их обработки. На эту роль претендует системный анализ.

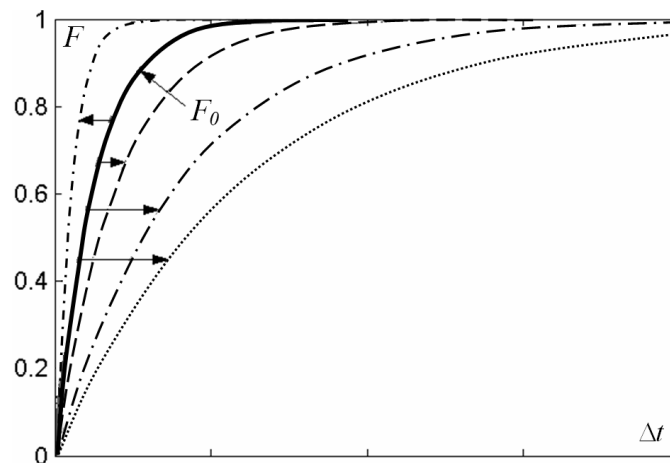
ЕДИНАЯ ТЕОРИЯ ПОДОБИЯ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА КАТАЛОГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Герман В.И.

ГПМК «Красноярский научно-исследовательский институт
геологии и минерального сырья», г. Красноярск, Россия
E-mail: german3v@yandex.ru

(устный доклад)

Единый механизм процесса разрушения горных пород на различных масштабных уровнях является физическим основанием теории подобия структуры сейсмичности. Ее базовым утверждением является: сейсмичность в одном энергетическом-пространственно-временном интервале (ЭПВИ) – масштабная версия сейсмичности в другом ЭПВИ. Это подобие не абсолютное, но статистическое: функция распределения характеристики, рассматриваемой в фиксированном ЭПВИ – масштабная (сжатая или растянутая по оси ординат) версия базовой функции распределения F_0 [German, 2006; Герман, 2010] (рис.).



Масштабирование базовой функции распределения временных интервалов F_0

Анализ каталогов сейсмических событий (землетрясений, горных ударов) подтверждает сформулированное утверждение о подобии функций распределения. Для различных ЭПВИ оно наблюдается для временных интервалов между последовательными событиями, минимальных расстояний между ними [German, 2006; Герман, 2010]. Распределения характеристик сейсмичности (масштабных, временных, пространственных) хорошо описываются двухпараметрическим семейством распределений [German, 2006; Герман, 2010]. При этом одним из параметров распределений является параметр формы, который от перехода между наборами данных (между ЭПВИ) меняется слабо и связан с фрактальными размерностями (в случае магнитудного распределения таким параметром является тангенс угла наклона графика повторяемости). Вторым параметром является масштабный параметр, который связан с уровнем сейсмической активности для выбранного набора данных (получены простые выражения для его оценки [German, 2006; Герман, 2010]). При этом описание характеристик сейсмичности функциями распределения является более

общим и более корректным по сравнению с использованием фрактальных размерностей, которые связаны со значением параметра формы распределения.

Наиболее известный пример подобия структуры сейсмичности – закон Гутенберга-Рихтера, который показывает, что распределение значений магнитуд землетрясений для разных ЭПВИ описывается одним и тем же законом распределения. В классическом варианте им является экспоненциальное распределение (применение гамма-распределения позволяет учесть загиб графика повторяемости в области больших значений магнитуд). Аналогичным образом, распределение временных интервалов между последовательными землетрясениями из различных ЭПВИ описывается одним и тем же семейством распределения [Герман, 2005; 2010; German, 2006]. Проведенные исследования показывают, что в качестве него может использоваться семейство распределений Вейбулла. Данное семейство распределений также хорошо описывает распределение пространственных интервалов между ближайшими в пространстве сейсмическими событиями из различных ЭПВИ [German, 2006; Герман, 2010].

Подобно использованию закона Гутенберга-Рихтера для решения ряда задач анализа каталогов землетрясений можно использовать подобие распределений временных и пространственных характеристик. В частности, фиксация нарушений такого подобия было использовано автором для выявления непредставительных данных (получено согласие с графиком повторяемости). Было также показано, что аномалии в поведении параметра формы распределения временных интервалов для Камчатско-Курильского региона хорошо коррелировали с его тектоническим строением. Предполагается возникновение подобных аномалий в процессе подготовки крупных землетрясений.

Литература

- Герман В.И.* Самоподобие временной структуры сейсмических событий на разных масштабных уровнях // Вулканология и сейсмология. 2005. Т. 3. С. 66–74.
- Герман В.И.* Единая теория подобия структуры сейсмичности: статистический подход. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2010. 80 с.
- German V.I.* Unified scaling theory for distributions of temporal and spatial characteristics in seismology // Tectonophysics. 2006. V. 424 (3–4). P. 167–175.

ПРОГНОЗ ОБРУШЕНИЙ НА РУДНИКАХ ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ПРИМЕРЕ ЖЕЗКАЗГАНСКОГО МЕДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Герман В.И.

ГПНК «Красноярский научно-исследовательский институт
геологии и минерального сырья», г. Красноярск, Россия
E-mail: german3v@yandex.ru

(устный доклад)

Жезказганское медное месторождение расположено в юго-западной части Центрального Казахстана. Активное его освоение началось в 50-х годах XX века. Подземные выработки месторождения занимают участок 10×10 км и уходят на глубину до 650 м. Месторождение преимущественно отрабатывалось камерно-столбовой системой.

Ведение горных работ на Жезказганском месторождении (ЖМ) привело к возникновению крупных обрушений, а также индуцировало возникновение мощных техногенных землетрясений. Сильнейшее из них произошло 01.08.1994 и имело магнитуду $M_S = 4.6$, $m_b = 4.8$ (по данным ЕГС РАН). Оно сопровождалось обрушением на площади 480 тыс. м^2 (900×680 м). Объем обрушившихся пород – 144 млн. м^3 , вес – 375 млн. т . В 1997 году была создана система сейсмического мониторинга ЖМ. Она позволила контролировать сейсмичность в местах ведения горных работ.

В связи со скоротечностью обрушений на ЖМ особое значение приобретает анализ пространственного и энергетического/масштабного распределений зарегистрированных событий, а также их изменения во времени. Применение основных положений концентрационного критерия разрушения твердых тел (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) и ЛНТ-модели (ИФЗ РАН) позволяет проводить такой анализ.

С 2007 по 2012 годы автор, работая в Корпорации Казахмыс, в режиме реального времени осуществлял прогноз обрушений на ЖМ. В качестве основного метода выделения опасных зон по данным сейсмического мониторинга использовался модифицированный концентрационный критерий разрушения твердых тел [Герман, 2010; 2014]. При этом для оценки концентрации дефектов использовался не концентрационный параметр k , а параметр сближения сейсмических событий κ , 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 :

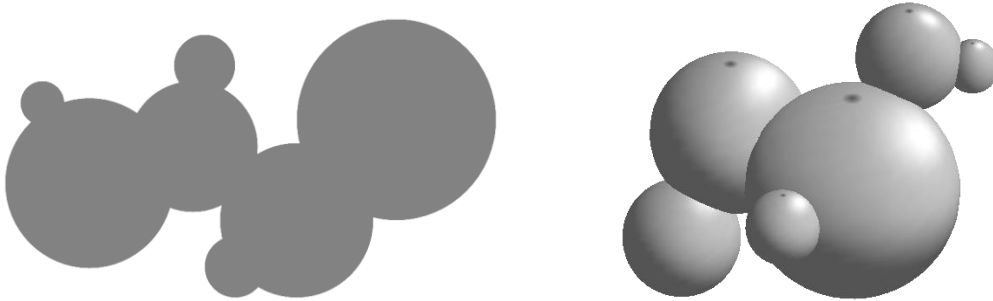
$$\kappa_{ij} = \frac{d_{ij}}{(L_i + L_j)/2},$$

где d_{ij} – расстояние между гипоцентрами/эпицентрами событий, 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 возникновение обрушения (рис.).



Цепочки из зон влияния событий, образующие потенциально опасные области:
а) на плоскости (если нет данных о глубине), б) в пространстве

Данная модификация концентрационного критерия разрушения твердых тел хорошо согласуется с представлениями механики разрушения. Используя типичную формулу для напряжений вокруг трещины размером L на расстоянии r , можно показать [Герман, 2014], 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 широко распространены в инженерной практике).

Дополнительно для прогноза обрушений использовались представления о формировании сейсмических брешей первого и второго рода, миграции сейсмичности, а также результаты визуальных наблюдений в шахте и наблюдений за оседанием поверхности над выработками.

С 2007 по 2012 гг. на ЖМ были спрогнозированы все основные обрушения [Герман, 2010; 2014]. Первый прогноз опасности возникновения выдавался, как правило, за месяц до реализации обрушения.

Литература

- Герман В.И. Прогноз обрушений на рудниках по данным сейсмического мониторинга // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 2. С. 99–109.
- Герман В.И., Мансуров В.А. Прогноз обрушений на Жезказганском медном месторождении // ГИАБ. 2010. № 1. С. 95–104.

ОБОБЩЕНИЕ МЕТОДА МИНИМАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ТРЕВОГИ ДЛЯ ПРОГНОЗА МАГНИТУД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Гитис В.Г., Дерендяев А.Б.

Институт проблем передачи информации РАН, г. Москва, Россия
E-mail: gitis@iitp.ru, wintsa@gmail.com

(устный доклад)

Метод минимальной области тревоги относится к методам машинного обучения, предназначенным для обнаружения редких аномальных объектов. Задача формулируется следующим образом. Пусть имеется множество объектов. Объект описывается набором своих свойств, выраженных в числовом виде (вектором признаков). Значения свойств объектов, близкие к максимально возможным, имеют малую вероятность. Среди множества объектов имеются аномальные. Они отличаются от остальных объектов тем, что значения некоторых из их свойств близки к максимальным. Пусть имеется учебная выборка из аномальных объектов (прецеденты). Остальные объекты множества не помечены и состоят из смеси нормальных и аномальных объектов. Представляется естественным классифицировать объект как аномальный, если соответствующий ему вектор признаков больше или равен покомпонентно одному из векторов, помеченных как прецеденты (условие монотонности). Однако описание свойств объектов обычно является неполным. Поэтому у некоторых прецедентов отсутствуют свойства, которые близки к максимальным значениям. Для таких прецедентов число объектов, классифицированных по ним как аномальные, может оказаться весьма большим, а сами объекты с большой вероятностью окажутся ошибочно классифицированы как аномальные.

Алгоритм минимальной области тревоги является непараметрическим. Его идея состоит в следующем. Каждому прецеденту соответствует ядерная функция, которая принимает значение 1 для векторов пространства признаков больших или равных покомпонентно вектору прецедента и значение 0 в остальных случаях. По условию монотонности предполагается, что объекты, векторам которых присвоено значение 1, являются аномальными. Таким образом, получаем, что каждому прецеденту соответствует множество классифицированных по нему аномальных объектов. Далее алгоритм выбирает максимальное число прецедентов, для которых мощность объединения этих множеств не превосходит заранее заданное число. Решающее правило классифицирует объекты только по отобраным прецедентам. Для остальных прецедентов следует искать новые отличительные свойства и добавлять их в пространство признаков. Объем вычислений алгоритма уменьшается, если отбирается не максимальное число прецедентов, а близкое к нему.

Пусть для анализируемого региона известны выборка эпицентров произошедших целевых землетрясений $q = 1, \dots, Q$ с магнитудами $m \geq M^{(1)}$ и набор сеточных полей признаков прогноза \mathbf{F}_i , $i = 1, \dots, I$. Поля \mathbf{F}_i заданы в единой координатной сетке. Значения полей в узлах сетки $n = 1, \dots, N$ соответствуют векторам I -мерного пространства признаков $\mathbf{f}^{(n)} = \{f_i^{(n)}\}$. Пусть шкала магнитуд разбита на K интервалов

$$J^{(1)} = [M^{(1)}, M^{(2)}), \quad J^{(2)} = [M^{(2)}, M^{(3)}), \quad \dots, \quad J^{(K)} = [M^{(K)}, M^{(K+1)}).$$

Качество прогноза определяют два показателя: (1) *вероятность обнаружения*, равная доле правильно обнаруженных целевых событий Q^* от всех целевых Q событий, $U = Q^*/Q$, и (2) *объем тревоги*, равный доле числа узлов сетки в области тревоги L^* от числа всех узлов сетки L области, в которой производится анализ, $V = L^*/L$. Алгоритм обобщенного метода минимальной тревоги решает две задачи: на материале обучения при заданном объеме тревоги V (1) обнаруживать максимальное (близкое к максимальному) число целевых событий и (2) оценивать интервалы, в которые попадают их магнитуды.

Алгоритм строит поле тревоги $\mathbf{A}(\mathbf{F}_i)$. Каждому узлу сетки n поля тревоги соответствуют атрибут объема тревоги V_n и один или несколько различных магнитудных атрибутов $J_n^{(q)}$. Параметры обнаружения эпицентра целевого землетрясения определяются по атрибутам ближайшего к нему узла сетки поля тревоги. Ограничив число узлов сетки значением объема тревоги V_{\max} , можно определить, какие целевые события с магнитудой $m \geq M^{(1)}$ обнаружены. Для этих событий дается прогноз магнитуды. Прогноз магнитуды является успешным, если магнитуда ожидаемого землетрясения попадает в магнитудный интервал, указанный как параметр обнаружения эпицентра соответствующего целевого землетрясения.

Имеются три версии алгоритма. Первая версия строит поле тревоги, в котором целевые события обнаруживаются в заранее заданной последовательности (эта версия выбрана для тестирования). Вторая версия позволяет оптимизировать поле тревоги так, чтобы при обнаружении каждого следующего целевого события объем тревоги увеличивался на минимальную величину. Третья версия позволяет оптимизировать поле тревоги так, что оно обнаруживает максимальное число событий при уровне объема тревоги не более заданного.

Метод минимального объема тревоги является основой ГИС-платформы прогноза землетрясений, которая тестирует технологию систематического прогноза землетрясений с февраля 2018 г. (<https://distcomp.ru/geo/prognosis/>). Платформа регулярно в автоматическом режиме с шагом $\Delta t = 49$ суток строит карты тревоги и предоставляет большой набор инструментов для анализа пространственно-временных процессов и прогноза землетрясений.

Тестирование метода минимального объема тревоги выполнено для Средиземноморья и Японии. При тестировании мы использовали общеизвестные характеристики каталогов землетрясений. Исследование более широкого набора полей признаков прогноза находится вне рамок настоящей работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 17-07-00494.

АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ И ОЦЕНКА СЕЙСМИЧНОСТИ КУЛУ-ТЕНЬКИНСКОГО РАЙОНА (МАГАДАНСКАЯ ОБЛАСТЬ) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Глухов А.Н., Седов Б.М.

Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им.

Н.А. Шило ДВО РАН, г. Магадан, Россия

E-mail: gluhov76@list.ru

(стендовый доклад)

Основное количество землетрясений приурочено к разломам, маркирующим границы литосферных блоков различного ранга [Шерман, 2011], а очаги наиболее сильных событий ($K > 14$) приурочены к местам их пересечения [Рогожин, 2000]. Изучение разломной структуры с оценкой тектонической активности разрывов позволяет дать интегральную оценку сейсмичности территории.

Кулу-Тенькинский район приурочен к границе Куларо-Нерского террейна Яно-Колымского с Вилигинским террейном Охотско-Корякского орогенных поясов. Глубинные разломы связаны с активными границами Евразийской, Тихокеанской и Северо-Американской плит. За период наблюдений (1924–2018 гг.) здесь произошли 1172 землетрясения с энергетическими классами $K = 5.3 - 14.3$ [Алешина, 2015]. Были использованы трехмерные цифровые модели рельефа SRTM и космические снимки LANDSAT. Установлено, что швы глубинных разломов слабо проявлены новейшими дислокациями, однако все землетрясения с $K > 12$ располагаются на удалении не более 20 км от них. Район наибольшего сгущения сети активных разломов совпадает с зонами концентрации эпицентров землетрясений, включая наиболее сильные из них ($K \geq 10$). Наиболее сейсмически активные очаги соответствуют узлам сочленения активных разломов северо-восточного и северо-западного простирания. Кулу-Тенькинский район можно рассматривать как территорию взаимодействия зон динамического влияния разломов, разделяющих Евразийскую, Северо-Американскую и Тихоокеанскую плиты.

Полученные результаты демонстрируют контроль размещения сейсмических очагов зонами пересечения региональных нарушений. Ранее [Соловьев, 2014] на примере Памира, Тянь-Шаня и Кавказа было показано, что сильные землетрясения приурочены к пересечениям зон активных линеаментов, разделяющих однородные блоки земной коры. О.В. Новикова и А.В. Горшков [Новикова, 2018] выделили подобные зоны как самостоятельные локальные тектонически активные структуры – высокосейсмичные пересечения – с поперечником в первые десятки километров. Дальнейшее применение подобного подхода к изучению сейсмичности Северо-Востока Азии представляет несомненный интерес.

Литература

Алешина Е.И., Годзиковская А.А., Гунбина Л.В., Коломиец М.В., Седов Б.М. Сводный каталог землетрясений Северо-Востока России с древнейших времен по 1974. Обнинск, Магадан: ГС РАН, 2015. 152 с.

- Новикова О.В., Горшков А.И.* Высокосейсмичные пересечения морфоструктурных линеаментов Черноморско-Каспийского региона // Вулканология и сейсмология. 2018. № 6. С. 23–31.
- Рогожин Е.А.* Тектоника очаговых зон сильных землетрясений Северной Евразии конца XX столетия // Российский журнал наук о Земле. 2000. Т. 2. № 1.
<http://eos.wdcb.ru/journals/rjes/rus/v02/rje99029/rje99029.htm>
- Соловьев А.А., Гвишиани А.Д., Горшков А.И.* Распознавание мест возможного возникновения землетрясений: Методология и анализ результатов // Физика Земли. 2014. № 2. С. 3–20.
- Шерман С.И., Злогодухова О.Г.* Сейсмические пояса и зоны Земли: формализация понятий, положение в литосфере и структурный контроль // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т. 2. Вып. 1. С. 1–34.

СПОСОБ ФИЛЬТРАЦИИ ШУМОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ВЫЗВАННЫХ ВАРИАЦИЯМИ ТЕМПЕРАТУРЫ СНАРУЖИ И ВНУТРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Гравиров В.В.^{1,2}, Кислов К.В.²

¹ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

² *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики
РАН, г. Москва, Россия
E-mail: gravirov@mail.ru*

(стендовый доклад)

Для решения широкого круга актуальных научных и прикладных задач в сейсмологии часто возникает необходимость в информации об истинном движении Земли при сейсмических событиях. Эта информация должна включать в себя не только знание точных значений движения/перемещения земной поверхности по трем осям в точке наблюдения, но также величины наклонов и поворотов поверхности. Но, к сожалению, вычислить истинные значения перечисленных выше величин не представляется возможным ввиду присутствия на записях различного рода шумов, зачастую не сейсмического происхождения [Ярошевич, 2016]. Одним из хорошо известных основных помехогенерирующих факторов, вызывающих шум в длиннопериодных сейсмических приборах, а также высокочувствительных наклонномерах, являются колебания температуры механических элементов приборов, а также колебания температуры во внутреннем пространстве этих приборов [Кислов, 2008; 2013]. С появлением все более широкополосных и длиннопериодных сейсмических приборов эта проблема начинает приобретать все более острый характер. Очевидно, что для создания любых сейсмических приборов, обладающих высоким разрешением, крайне необходимо разрабатывать эффективные аппаратные и программные средства и методы защиты от шума. Следует отметить, что такая защита от шума представляет собой достаточно сложную техническую и алгоритмическую задачу, для решения которой разработанные ранее методы защиты короткопериодных сейсмических датчиков оказываются неэффективными [Doody, 2018]. Одним из возможных решений поставленной задачи можно считать использование оригинального цифрового следящего фильтра, реализованного с использованием техники оптимальной и адаптивной фильтрации [Гравиров, 2009]. Основное отличие оптимальных методов адаптивной фильтрации от классических цифровых фильтров заключается в наличии обратной связи и, следовательно, передаточной функции, изменяющейся во времени в зависимости от обрабатываемых сигналов. Реализованный метод цифровой обработки сейсмических сигналов основан на использовании записей одного или нескольких опорных сигналов – температурных шумовых сигналов, которые коррелированы или слабо коррелированы с записанным основным сейсмическим сигналом. Ввиду того, что невозможно напрямую визуально проверить правильность работы разработанного следящего фильтра, поскольку нельзя записать «чистый» тестовый сейсмический сигнал с выхода сейсмометра, был проведен ряд тестовых экспериментов, показывающих работоспособность алгоритма.

Литература

- Гравиров В.В.* Применение оптимальных фильтров для выделения сейсмических сигналов длиннопериодного канала гиронаклономера // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45. № 1. С. 23–33.
- Кислов К.В., Гравиров В.В.* Один из путей генерации температурной помехи широкополосного сейсмометра // Электр. научн. ж. "Исследовано в России". 2008. № 27. С. 313–321.
- Кислов К.В., Гравиров В.В.* Исследование влияния окружающей среды на шум широкополосной сейсмической аппаратуры: Вычислительная сейсмология. Вып. 42. М.: Красанд, 2013. 240 с.
- Ярошевич М.И., Ингель Л.Х., Лысенко Д.А.* Сейсмические проявления атмосферных процессов // Научное обозрение. Технические науки. 2016. № 5. С. 103–115.
- Doody C.D., Ringler A.T., Anthony R.E., Wilson D.C., Holland A.A., Hutt C.R., Sandoval L.D.* Effects of Thermal Variability on Broadband Seismometers: Controlled Experiments, Observations, and Implications // Bulletin of the Seismological Society of America. 2018. V. 108 (1). P. 493–502. DOI: 10.1785/0120170233

ОТДЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ТЕРМОДАТЧИКОВ СВЕРХВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ

Гравиров В.В.^{1,2}, Лиходеев Д.В.¹, Кислов К.В.²

¹ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

² *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики*

РАН, г. Москва, Россия

E-mail: gravirov@mail.ru

(устный доклад)

Методы измерения температуры разрабатываются уже несколько сотен лет. Уже давно человечество осознало необходимость измерения температуры как воздуха, так и разнообразных твердых и жидких тел. Знание температуры позволяет правильно приготовить пищу, подобрать соответствующую одежду, вовремя начать сельскохозяйственные работы и т.п. В последние столетия необходимость измерения точной температуры значительно возросла ввиду того, что многие технологические и производственные процессы требуют строго определенных температур, причем иногда точность поддержания температуры должна выдерживаться до сотых градуса. В настоящее время существуют аналоговые ртутные термометры, обеспечивающие точность измерений порядка 0.01°C , и электронные – 0.001°C . Дальнейшее увеличение точности измерений уже связано с существенным усложнением электронных устройств измерений, поскольку величины паразитных шумов зачастую могут превышать значения измеряемых величин. Разработанная нами серия высокочувствительных термодатчиков позволяет гарантированно контролировать температуру исследуемого объекта с точностью порядка 0.01 градуса Цельсия. Первопричиной их разработки послужила задача высокоточного измерения температурного режима в вырубке штольни Баксанской нейтринной обсерватории (БНО ИЯИ РАН) на расстоянии 4100 м от устья штольни [Собисевич, 2008; Маловичко, 2014]. В течение 2017–2019 годов были проведены опытно-конструкторские работы, которые позволили создать несколько прототипов будущего электронного термодатчика [Лиходеев, 2018; 2019]. Для проверки использованных технических решений были отобраны и изготовлены несколько вариантов опытных прототипов. В результате тестовых измерений удалось достичь чувствительности измерения температуры порядка 0.001 – 0.0005°C при динамическом диапазоне измерений от 10°C до 40°C . Для целей долговременных испытаний комплекс из 12-ти дифференциальных термодатчиков был установлен в составе системы постоянного температурного мониторинга Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН в штольне БНО ИЯИ РАН, что позволяет получать информацию как о долговременной стабильности функционирования разработанных прототипов, так и получить высокоточные данные о динамике температурного поля в окрестности вулкана Эльбрус и таким образом внести важный вклад в продолжающееся комплексное изучение Эльбрусского вулканического центра, что особенно актуально в свете активно развивающейся туристической инфраструктуры как в Баксанском ущелье, так и в Приэльбрусье в целом. Однако возможное применение приборов подобного типа не ограничивается только измерением

температур горных пород или разнообразных грунтов. Высокочувствительные термодатчики подобной конструкции позволят осуществлять высокоточный многоточечный мониторинг температур внутри любых геофизических приборов. Окружающая температура, как и температурный режим внутри, например наклономера, оказывают существенное влияние на значения его выходных сигналов [Кислов, 2013]. В связи с этим совершенно очевидно, что при проведении особо точных наблюдений необходимо проводить мониторинг температуры подобных приборов [Кислов, 2008б; Гравиров, 2008]. Также такие термометры найдут широкое применение при отладке новых приборов, поскольку установка любых исполнительных устройств или электронных схем во внутреннем объеме сейсмических приборов будет вызывать внутренний локальный нагрев воздуха внутри прибора, что может приводить как к возникновению локальных конвекционных воздушных потоков, так и к появлению длиннопериодных термических волн, оказывающих влияние как на элементы конструкции прибора, так и на сам чувствительный элемент прибора, например маятник, в случае сейсмометра [Кислов, 2008а]. Помехи подобного типа относятся к классу трудно идентифицируемых [Гравиров, 2009]. Учет их влияния до сегодняшнего дня являл собой весьма затруднительную задачу ввиду отсутствия доступных датчиков широкого применения – высокочувствительных малогабаритных электронных термометров.

Литература

- Гравиров В.В.* Применение оптимальных фильтров для выделения сейсмических сигналов длиннопериодного канала гиронаклономера // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45. № 1. С. 23–33.
- Гравиров В.В., Кислов К.В.* Критичность сейсмометра к вариациям параметров // Электр. научн. ж. "Исследовано в России". 2008. № 26. С. 301–312.
- Кислов К.В., Гравиров В.В.* Один из путей генерации температурной помехи широкополосного сейсмометра // Электр. научн. ж. "Исследовано в России". 2008а. № 27. С. 313–321.
- Кислов К.В., Гравиров В.В.* Шумы упругих элементов сейсмической аппаратуры // Естественные и технические науки. 2008б. Т. 37. № 5. С. 142–148.
- Кислов К.В., Гравиров В.В.* Исследование влияния окружающей среды на шум широкополосной сейсмической аппаратуры: Вычислительная сейсмология. Вып. 42. М.: Красанд, 2013. 240 с.
- Лиходеев Д.В., Гравиров В.В., Кислов К.В.* Прецизионные дифференциальные термометры для исследования тепловых процессов на базе северокавказской геофизической обсерватории // Наука и технологические разработки. 2018. Т. 97. № 1. С. 15–24.
- Лиходеев Д.В., Гравиров В.В., Кислов К.В., Долов С.М.* Прецизионные узкодиапазонные дифференциальные температурные датчики // Научное приборостроение. 2019. Т. 29. № 1. С. 11–16.
- Маловичко А.А., Габсатарова И.П., Лиходеев Д.В., Заклюковская А.С., Преснов Д.А.* Развитие системы разномасштабного сейсмического мониторинга в районе вулкана Эльбрус // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50. № 4. С. 47–57.
- Собисевич А.Л., Гриднев Д.Г., Собисевич Л.Е., Канониди К.Х.* Аппаратурный комплекс Северокавказской геофизической обсерватории // Сейсмические приборы. 2008. Т. 44. № 1. С. 21–42.

КАРТЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ АРМЕНИИ: ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ, НОВЫЕ НОРМАТИВНЫЕ КАРТЫ ОСР РА

Григорян В.Г., Карапетян Дж.К.

*Институт геофизики и инженерной сейсмологии им. А. Назарова НАН РА,
г. Гюмри, Армения*

E-mail: g.vanand@rambler.ru; jon_iges@mail.ru

(устный доклад)

За последние десятилетия существенно возросло внимание к вопросам землетрясений и сейсмической безопасности общества. Об этом свидетельствуют не только национальные программы по изучению этой проблемы, но и большие усилия и инициативы различных международных гуманитарных организаций.

Упорядоченные научно-исследовательские работы с целью создания карт сейсмического районирования территории Армении начались в 40-е годы в рамках программ по созданию карт ОСР для всей территории СССР (бывш.).

Картина, отражающая сейсмическую интенсивность на картах, созданных до 60-х годов, была достаточно противоречива (впрочем, и в последующих картах ОСР территории Армении) [Пирузян, 1969].

Сравнительно удачными оказались карты сейсмического районирования территории Арм. ССР, созданные в 1968, 1978 и 1994 гг. При этом последняя, как отдельная карта ОСР территории РА (уже независимой) в масштабе 1:500000, была включена в национальные нормы по сейсмостойкому строительству [Сейсмическое районирование..., 1968; Сейсмическое районирование..., 1980; СНРА..., 2006].

После катастрофического землетрясения 7 декабря 1988г., произошедшего в Армении, с целью оперативного восстановления разрушенных городов и населенных пунктов в максимально сжатые сроки были составлены несколько вариантов карт ОСР [Габриелян, 1989; Баласанян, 2004].

Несмотря на то, что при составлении этих карт, помимо всего, были широко использованы и учтены результаты обследования последствий Спитакского землетрясения, они содержали существенные недостатки и поэтому не приобрели статус нормативной карты ОСР РА.

На основе разработанных и усовершенствованных методов оценки параметров воздействий с применением обновленных данных и новых, современных методов и технологии картирования в 2002 г. была составлена карта сейсмической опасности территории Армении в масштабе 1:200000 (автор В.Г. Григорян) [Григорян, 2005].

В период 2016–2019 гг. по инициативе МЧС РА под руководством международного консорциума была подготовлена и представлена новая вероятностная карта сейсмической опасности территории Армении в масштабе 1:500000 (исполнители AIR, GEM и Georisk) [Вероятностная карта ..., 2018].

Однако новая карта, претендующая стать нормативной, не удовлетворяет некоторым, очень важным критериям составления таких карт вообще и данной в частности.

Как известно, основополагающими при создании карт ОСР последних поколений являются два важнейших базовых данных: карта сейсмогенных зон с оценками сейсмических потенциалов (M_{\max}) основных (выделенных) структурных элементов ВОЗ и модель сейсмического эффекта [Уломов, 2008]. Ни того, ни другого мы не нашли в представленных отчетах по разработке новой карты ОСР. И еще одна немаловажная деталь: г. Гюмри во всех предыдущих картах ОСР РА находился в зоне наивысшей сейсмической опасности (выраженной в баллах или в PGA), что вполне закономерно. По версии новой карты, он совершенно необоснованно перенесен в зону со средним показателем PGA, невзирая на то, что во время Спитакского землетрясения 07.12.1988 г. там фиксировались ускорения грунта, достигавшие 0.6–0.8 g.

В настоящем докладе широкой научной публике в качестве альтернативной карты мы представляем новую, разработанную в ИГИС НАН РА, вероятностную карту ОСР территории Армении в масштабе 1:500000 (рис.).



Считаем, что она более объективно отражает истинную картину сейсмической опасности территории РА.

Подробное описание методологии и использованных данных при разработке карты варианта ИГИС НАН РА приведены в [Григорян, 2019].

Литература

- Баласанян С.Ю., Назарян С.Н., Амирбекян В.С.* Сейсмическая защита и ее организация. Гюмри: Эльдorado, 2004. 436 с.
- Вероятностная карта сейсмической опасности территории Армении в масштабе 1:500000. (Объяснительная) AIR, GEM, Georisk. 2018. 44 с. (на армянском языке)
- Габриелян А.А., Симонян Г.П., Пирузян С.А., Геодакян Э.Г.* Новая схема сейсмического районирования территории Армянской ССР // Изв. Науки о Земле АН АРМ ССР. 1989. Т. 42. №4. С. 3–10.
- Григорян В.Г.* Основная задача теории количественного сейсмического районирования (на примере территории Армении) // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2005. № 5. С. 42–44.
- Григорян В.Г., Каранетян Дж.К., Казарян К.С., Саргсян Р.С.* Сейсмическая опасность территории Армении: Нормативные карты районирования. Предварительный вариант новой карты ОСР // Геология и геофизика юга России. 2019. Т. 9. №1. С. 71–84.
- Пирузян С.А.* Опыт детального сейсмического районирования территории Большого Ереванского района. Ереван: Айастан, 1969. 91 с.
- Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. 476 с.
- Сейсмическое районирование территории СССР. Методические основы и региональное описание карты 1978 г. М.: Наука, 1980. С. 131–137.
- СНРА П-6.02.2006. Сейсмостойкое строительство. Нормы проектирования. Ереван, 2006. 54 с.
- Уломов В.Н.* Оценка сейсмической опасности и актуализация инженерных решений // Сейсмическое строительство. Безопасность сооружений. 2008. № 3. С. 16–21.

ИЗУЧЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ВЫЯВЛЕНИЕ ПРЕДВЕСТНИКОВ СИЛЬНЫХ ($M \geq 5$) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ВАРИАЦИЙ КОМПОНЕНТОВ ВЕКТОРА ПЕРЕМЕННОГО ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРИМЕРЕ АРМЕНИИ, СЕВЕРНОГО КАВКАЗА И ИТАЛИИ

Григорян А.Г., Лиходеев Д.В.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

E-mail: ag-grig@ifz.ru

(устный доклад)

Развитие геодинамических процессов сопровождается изменением напряженно-деформационного состояния земной коры и накоплением сейсмогенерирующей энергии. С целью изучения геодинамических и, в частности, сеймотектонических процессов предлагается методика изучения вариаций локального геомагнитного поля внешнего происхождения, связанных с изменением электропроводности на разных глубинах земной коры и верхней мантии. Методика позволяет выявить и оценить изменения электропроводности или электромагнитной индукции, используя вариации геомагнитного поля внешнего происхождения. Известно, что взаимодействие солнечных корпускулярных потоков с магнитным полем Земли и сложные токовые системы в ионосфере и магнитосфере, возникающие в результате этого взаимодействия, являются источниками локальных геомагнитных вариаций, наблюдаемых на поверхности Земли.

Вариации переменного магнитного поля δH^H , регистрируемые на поверхности земли, являются суммой внешней индуцирующей δH^e и внутренней индуцированной δH^i составляющих:

$$\delta H^H = \delta H^e + \delta H^i.$$

Выделить аномалии электромагнитного поля, связанные с изменением электропроводности, из суммарных вариаций геомагнитного поля с помощью только синхронной разности ΔT почти невозможно. Они возникают как за счет изменения физических, геологической среды, так и за счет преобразования токовых систем в ионосфере и магнитосфере.

Нами изучены аномальные вариации δT поля (поле, создаваемое внешним источником) за счет изменения электрических свойств геологической среды. Для решения этой задачи был применен параметр $N(A)$, который является отношением амплитуд вариаций локального геомагнитного поля, измеренных синхронно на разных парах станций.

$$N(A) = A_i / A_j,$$

где A_i и A_j являются амплитудами синхронно измеренных вариации в фиксированных пунктах (i, j).

Поскольку пространственно-временная структура поля S_q и бухтообразных вариаций для уровня магнитной активности $K_p \leq 4$ однородная и не вносит значительных искажений в параметр $N(A)$ на исследуемой территории, то изменения параметра главным образом вызваны индуцированной δH^i составляющей [Григорян, 1999].

Применение предлагаемой методики иллюстрируется на примере изучения временных рядов геомагнитных данных, полученных на территории Армении (1986–1992 гг.), Италии (2008–2009 гг.) и в районе Эльбрусского вулканического центра (2013–2016 гг.). Результаты расчетов параметра $N(A)$ для компонент δZ , δH , δD на территории северной части Армении показали, что аномальные изменения параметра для Спитакского землетрясения 1988 г. ($M = 7.0$) составляет 35%, а для Парванийского 1986 г. ($M = 5.6$) около 20%.

Аномальные изменения в электропроводности также зафиксированы в Италии перед апрельским землетрясением 2009 г. ($M = 6.1$).

В районе Эльбрусского вулканического центра значительные аномалии не зафиксированы, что согласуется с отсутствием в этом районе сильных землетрясений за период 2012–2016 гг. Причина аномальных изменений проводимости горных пород, по-видимому, восходящая миграция флюидов из глубоких частей коры и из верхней мантии через глубинные разломы.

Предлагаемая методика позволила выяснять тонкую структуру вариаций компонент геомагнитного поля (δZ , δH , δD) и выделить наиболее геодинамические активные зоны. Использование вариаций разных периодов (10–25, 30–60 минут и активная, т.е. дневная часть солнечно-суточных Sq-вариаций) позволило изучить развитие геодинамических процессов на разных горизонтах земной коры (до мантии) [Григорян, 2017], а также изучить современные вулканические процессы в районе Эльбрусского вулканического центра.

Литература

- Григорян А.Г., Сковородкин Ю.П.* Пространственно-временные изменения переменного магнитного поля при изучении геодинамических процессов в земной коре на территории Армении // Труды науч. конф., посвящ. памяти А.Г. Бабаджяна. Гюмри, 1999.
- Григорян А.Г., Лиходеев Д.В., Орлов А.В.* Исследования вариации геомагнитного поля внешнего происхождения, с целью оценки изменений электропроводности, на разных глубинах земной коры // Международ. конф., посвящ. 50-летию открытия Центральной Геофизической обсерватории. Обнинск, 2017.

АЛГОРИТМ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ ОТ СЛАБЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОСНОВЕ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ: ПРИМЕР ОБРАБОТКИ РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ И СРАВНЕНИЕ С КЛАССИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Дергач П.А., Логинов Г.Н.

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Россия

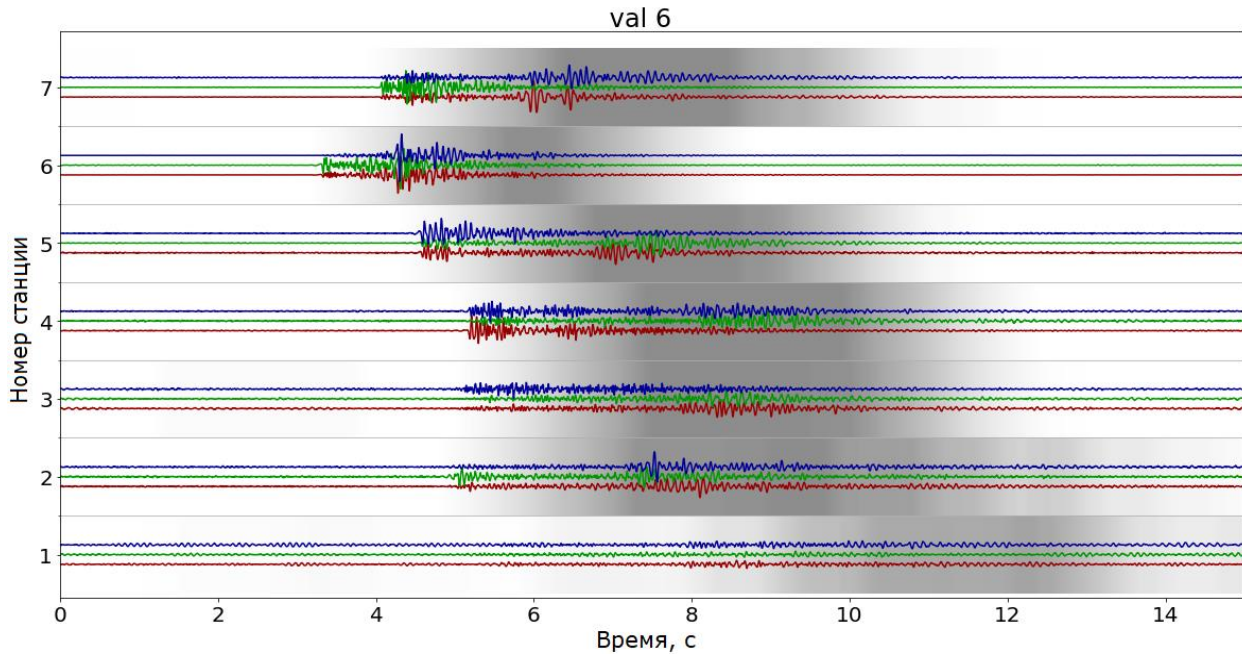
(стендовый доклад)

Автоматический поиск сейсмических сигналов от землетрясений в непрерывных записях является важнейшим этапом в графе обработки сейсмологических данных. Традиционно для решения этой задачи используется алгоритм STA/LTA [Coppens, 1985], однако он малоэффективен при низком соотношении сигнал/шум, которое характерно для сигналов от слабых землетрясений. В то же время, выделение таких сигналов значительно увеличивает общее количество землетрясений, попадающих в каталог [Aki, 2002]. Особые проблемы возникают при обработке данных с локальных сейсмологических сетей, территория которых характеризуется высоким уровнем техногенных сейсмических шумов, например, мониторинга разработки месторождений. Руководствуясь этим, для тестирования алгоритмов детектирования были выбраны именно такие данные, как наиболее сложный случай для выделения сигналов от слабых землетрясений.

В данной работе представлены результаты обработки записей с использованием алгоритма детектирования на основе сверточной нейронной сети [Логинов, 2019]. Кроме того, производился их сравнительный анализ с результатами популярного алгоритма модифицированного отношения энергий MER [Han, 2010], относящегося к классу подходов, схожих с классическим STA/LTA. Оба алгоритма были программно реализованы авторами на языках Python и MATLAB соответственно. В обоих алгоритмах обработка производилась отдельно для трех компонент каждого пункта наблюдений, а уже после этого строилась детектирующая функция для всех станций.

Чтобы соблюсти чистоту эксперимента, сигналы для обучающей выборки были взяты из другой локальной сети сейсмологического мониторинга (размер выборки составил 1240 трехкомпонентных сигналов от локальных землетрясений). Непосредственно на обработку подавались часовые фрагменты записей (48 штук), заведомо содержащие сигналы от слабых локальных землетрясений. Это позволило предварительно провести визуальный анализ записей на наличие сигналов от слабых землетрясений и в дальнейшем верифицировать результаты работы алгоритмов. В итоге, в записях присутствовали сигналы от 50 локальных землетрясений с магнитудами M в диапазоне от 0.4 до 1.6.

На рисунке приведен пример использования алгоритма на основе сверточной нейронной сети. Черным цветом показано распределение вероятности нахождения сигнала от землетрясения на каждой отдельно взятой станции.



Пример триггер файла локального землетрясения с магнитудой $m_l=1$. Значение детектирующей функции 6.

В результате обработки данных обоими алгоритмами были задетектированы все землетрясения, зарегистрированные не менее чем четырьмя станциями, и пропущено по одному землетрясению, со значением детектирующей функции равной 3. Однако количество ложных срабатываний у алгоритма MER значительно выше (19 против 2), что становится критичным при обработке большого количества файлов, и делает его гораздо менее эффективным.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Новосибирской области в рамках научного проекта № 19-45-540007.

Литература

- Aki K., Richards P.G.* Quantitative seismology. University Science Books, 2002. 700 p.
- Coppens F.* First arrival picking on common-offset trace collections for automatic estimation of static corrections // *Geophysical Prospecting*. 1985. Т. 33. № 8. С. 1212–1231.
- Han L., Wong J., Bancroft J.* Time picking on noisy microseismograms // *Proceedings of the GeoCanada 2010 Convention—Working with the Earth*, Calgary, AB, Canada. 2010. С. 4.
- Логинов Г.Н., Дучков А.А., Литвиченко Д.А., Алямкин С.А.* Пример применения сверточных нейронных сетей в обработке реальных данных 3D сейсморазведки // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь: XV Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 24–26 апреля 2019 г.): Междунар. науч. конф.* 2019. Т. 2. № 3. С. 147–153.

ВАРИАТИВНЫЙ МЕТОД ЕРА И ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

Дзедобов Б.А., Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Белов И.О.

Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия

E-mail: b.dzeboev@gcras.ru

(устный доклад)

Определение мест возможного возникновения землетрясений является существенной частью сейсмического районирования – важнейшей проблемы сейсмологии. При этом сильные ($M \geq M_0$, где M_0 – заданный порог) для изучаемого региона землетрясения, как правило, могут возникать не на всей его территории. Для разделения территории на две непересекающиеся области, где возможно и нет возникновения сильных землетрясений, на протяжении последних 50-ти лет используются алгоритмы дихотомии с обучением. Еще в 1972 г. И.М. Гельфанд, В.И. Кейлис-Борок, Е.Я. Ранцман и др. впервые успешно применили алгоритм распознавания с обучением по двум классам «Кора-3» для распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений в регионе Памир и Тянь-Шань. Разработанный ими подход, получивший позже название ЕРА (Earthquake-Prone Areas recognition), на протяжении многих лет успешно использовался для распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений в большинстве горных странах мира [Гвишиани, 1988; Соловьев, 2014].

С момента создания метода ЕРА в семидесятых годах прошлого века актуальным остается вопрос достоверности результатов, получаемых с помощью алгоритмов дихотомии, в которых обучение происходит по потенциально пересекающимся обучающим выборкам разного качества. В Геофизическом центре РАН построен новый алгоритм «Барьер-3», обучение в котором выполняется по одному «чистому» высокосейсмичному обучающему классу. Последнее принципиально отличает «Барьер-3» от использованных ранее в ЕРА алгоритмов дихотомии [Гвишиани, 2017; Дзедобов, 2019].

В алгоритме «Барьер-3» процесс обучения ведется только по одному высокосейсмичному «чистому» классу обучения, а обучение низкосейсмичного класса отсутствует. При этом «Барьер-3» решает задачу построения в исходном конечном множестве альтернатив (здесь под множеством альтернатив мы понимаем множество объектов распознавания) на основе совокупности скалярных признаков подмножества, близкого к единственному классу обучения. Для этого по каждому признаку строится мера различия между произвольными альтернативами. Идея построения меры состоит в выявлении и количественном оценивании «барьера», мешающего близости альтернатив в данном признаке. Меры барьера играют роль метрик на исходном множестве. Это позволяет придать точный смысл понятиям близости к заданному подмножеству на основе совокупности признаков [Гвишиани, 2017].

Алгоритм «Барьер-3», обучаясь только по одному высокосейсмичному классу, не является, вообще говоря, алгоритмом дихотомии. Однако он может эффективно использоваться в методе ЕРА, заменяя собой классические алгоритмы дихотомии. «Барьер-3» также

делит территорию на две непересекающиеся области, где, соответственно, могут или нет возникать сильные ($M \geq M_0$) землетрясения [Гвишиани, 2017; Дзебоев, 2019].

Алгоритм «Барьер-3» хорошо зарекомендовал себя при распознавании мест возможного возникновения сильных землетрясений с одним классом обучения на Кавказе ($M \geq 6.0$) и в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье ($M \geq 6.0$) [Гвишиани, 2017; Дзебоев, 2019]. Этот факт укрепляет предположения о том, что распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений по единственному чистому классу обучения путем его расширения адекватно постановке проблемы ЕРА. Использование «Барьера-3» принципиально не меняет процедуру распознавания ЕРА. Изменяется лишь блок распознавания с обучением. На место алгоритма дихотомии приходит «Барьер-3», оставляя без изменения блоки морфоструктурного районирования и измерения геолого-геофизических параметров. Таким образом, предлагается тезис о том, что в классической методике ЕРА возможно варьирование блока распознавания образов: «Алгоритм дихотомии» ↔ «Барьер-3». При хорошей согласованности обоих вариантов можно говорить о большой достоверности результата [Дзебоев, 2019].

Заметим, что полученные независимо положительные варианты распознавания алгоритмами «Барьер-3» и «Алгоритм дихотомии» делают их контрольными экспериментами друг для друга. В случаях достаточной близости результатов эти контрольные эксперименты следует признавать удачными. Это повысит оценку достоверности как результата ЕРА «Алгоритм дихотомии», так и ЕРА «Барьер-3». Одним из возможных вариантов интерпретации совместного результата распознавания алгоритмами «Алгоритм дихотомии» и «Кора-3» может быть его определение как нечеткого множества [Дзебоев, 2019].

Литература

- Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Дзебоев Б.А., Белов И.О. Распознавание мест возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений с одним классом обучения // Доклады Академии наук. 2017. Т. 474. № 1. С. 86–92.
DOI: 10.7868/S0869565217130175
- Гвишиани А.Д., Гориков А.И., Ранцман Е.Я., Систернас А., Соловьев А.А. Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. М.: Наука, 1988. 176 с.
- Дзебоев Б.А., Гвишиани А.Д., Белов И.О., Татаринов В.Н., Агаян С.М., Барыкина Ю.В. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений на основе алгоритма с единственным чистым классом обучения: I. Алтай-Саяны-Прибайкалье. $M \geq 6.0$ // Физика Земли. 2019. № 4. С. 33–47. DOI: 10.31857/S0002-33372019433-47
- Соловьев А.А., Гвишиани А.Д., Гориков А.И., Добровольский М.Н., Новикова О.В. Распознавание мест возможного возникновения землетрясений: методология и анализ результатов // Физика Земли. 2014. № 2. С. 3–20. DOI: 10.7868/S0002333714020112

ВСЁ, ЧТО НАДО ЗНАТЬ О ГЕОДИНАМО, ЗА 15 МИНУТ

Желиговский В.А.

*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики
РАН, г. Москва, Россия
E-mail: vlad@mitp.ru*

(устный доклад)

В докладе дан краткий обзор развития теории гидромагнитного динамо в применении к планетарным динамо. Интерес к ней связан с тем, что магнитное поле препятствует срыву атмосферы Земли солнечным ветром и попаданию на Землю потоков высокоэнергетических космических частиц, что важно для существования жизни на ее поверхности. Считается [Моффат, 1980], что магнитные поля Земли и многих других астрофизических объектов создаются конвекцией электропроводного расплава в ее недрах [Larmor, 1919a; Larmor, 1919b]. Это динамический процесс; по палеомагнитным данным раз в несколько сот тысяч – миллион лет происходят инверсии геомагнитного поля, в которых его полярность за время порядка 10³–10⁴ года меняется на противоположную [Cox, 1969; Jacobs, 1994]. Последняя инверсия произошла 773 тысяч лет назад [Singer, 2019]. Возможно, сейчас наблюдается начало новой инверсии [Laj, 2015]. Остается ли магнитное поле на протяжении всей инверсии достаточно сильным для сохранения своих защитных свойств, неизвестно.

Вначале в теории динамо рассматривали задачу кинематического динамо, т.е. задачу на линейную устойчивость. Первыми были доказаны теоремы антидинамо [Cowling, 1934; Cowling, 1957; Зельдович, 1956; Зельдович, 1980; Вишик, 1988]. Взаимодействие флуктуирующих мелкомасштабных составляющих магнитного поля и скорости турбулентного течения может возбуждать среднюю электродвижущую силу, параллельную полю скорости, и этот механизм способен генерировать средние поля. Эта идея [Parker, 1955] лежит в основе теории электродинамики средних полей [Краузе, 1984], где введены понятия α -эффекта и вихревой диффузии (β -эффект). Математически строгие результаты получены для полей с сильным разделением пространственных масштабов [Zheligovsky, 2011]; доказано, что α -эффект в течениях общего вида гарантирует генерацию ими длинномасштабных магнитных полей [Вишик, 1987].

Однако моделирование инверсий магнитного поля требует рассмотрение конвективного динамо в полной нелинейной постановке. Это сложно, т. к. параметры во внешнем ядре Земли экстремальны и необходимо большое пространственное разрешение. Глатцмайер [Glatzmaier, 1995; Christensen, 1999] и другие исследователи проводили расчеты для параметров (в частности, коэффициентов диффузии), отличающихся от реальных на много порядков, однако их результаты физически правдоподобны! Этот парадокс разрешается предположением, что важны не молекулярные диффузии, а турбулентные [Starchenko, 2019].

Остаются открытыми вопросы: 1) Тензоры вихревой диффузии, найденные асимптотическими методами, анизотропны. Какие эффекты даст учет анизотропии в численных моделях геодинамо? 2) Вихревая диффузия возникает в асимптотических разложениях только при большом разделении масштабов, однако расчеты [Желиговский, 2020] указывают

на действие каскада неустойчивостей с возбуждением бóльших пространственных масштабов, но незначительно бóльших. Таким образом, понятие вихревой (турбулентной) диффузии требует дальнейшего изучения и формализации. 3) Возможен ли прогноз времени инверсий?

Литература

- Вишик М.М.* Периодическое динамо. II // Численное моделирование и анализ геофизических процессов (Вычисл. сейсмология, вып. 20). М.: Наука, 1987. С. 12–22.
- Вишик М.М.* О возбуждении магнитного поля трехмерным стационарным потоком проводящей жидкости при больших магнитных числах Рейнольдса // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1988. № 3. С. 3–12.
- Желиговский В.А., Чертовских Р.А.* О кинематической генерации магнитных мод блоховского типа // Физика Земли. 2020. № 1. (В печати)
- Зельдович Я.Б.* Магнитное поле в проводящей турбулентной жидкости при двумерном движении // ЖЭТФ. 1956. Т. 31. С. 154–156.
- Зельдович Я.Б., Рузмайкин А.А.* Магнитное поле в проводящей жидкости, движущейся в двух измерениях // ЖЭТФ. 1980. Т. 78. С. 980–986.
- Краузе Ф., Рэдлер К.-Х.* Магнитная гидродинамика средних полей и теория динамо. М.: Мир, 1984. 320 с.
- Моффат Г.* Возбуждение магнитного поля в проводящей среде. М.: Мир, 1980. 339 с.
- Christensen U., Olson P., Glatzmaier G.A.* Numerical modeling of the geodynamo: A systematic parameter study // Geophys. J. Int. 1999. V. 138. P. 393–409.
- Cowling T.G.* The magnetic field of sunspots // Month. Not. Roy. Astr. Soc. 1934. V. 94. P. 39–48.
- Cowling T.G.* The dynamo maintenance of steady magnetic fields // Quart. J. Mech. App. Math. 1957. V. X. P. 129–136.
- Cox A.* Geomagnetic reversals // Science. 1969. V. 163. P. 237–245.
- Glatzmaier G.A., Roberts P.H.* A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal // Nature. 1995. V. 377. P. 203–209.
- Jacobs J.A.* Reversals of the Earth's magnetic field. Cambridge University Press, 1994. 358 p.
- Laj C., Kissel C.* An impending geomagnetic transition? Hints from the past // Frontiers in Earth Science. 2015. V. 3. P. 61.
- Larmor J.* How could a rotating body such as the Sun become a magnet? // Rep. Brit. Assoc. Adv. Sci. 1919a. V. 87. P. 159–160.
- Larmor J.* Possible rotational origin of magnetic fields of Sun and Earth // Electr. Rev. 1919b. V. 85. P. 412.
- Parker E.N.* Hydrodynamic dynamo models // Astrophys. J. 1955. V. 122. P. 293–314.
- Singer B.S., Jicha B.R., Mochizuki N., Coe R.S.* Synchronizing volcanic, sedimentary, and ice core records of Earth's last magnetic polarity reversal // Science Advances. 2019. V. 5. Article eaaw4621.
- Starchenko S.V.* Simple planetary convection and magnetism estimations via scaling and observations // Problems of Geocosmos-2018: Proc. XII International Conference and School / Eds. T.B. Yanovskaya, A. Kosterov, N.Yu. Bobrov, A.V. Divin, A.K. Saraev, N.V. Zolotova. Cham: Springer, 2019. P. 179–189.
- Zheligovsky V.A.* Large-scale perturbations of magnetohydrodynamic regimes: linear and weakly non-linear stability theory. Springer, 2011. 352 p. DOI: 10.1007/978-3-642-18170-2

СОСТОЯНИЕ СЕЙСМИЧНОСТИ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ КАЗАХСТАНА ЗА 2015-2019 ГГ.

Жунусова А.Ж.¹, Бектурганова Б.Б.¹, Досайбекова С.К.¹, Садыкова А.Б.²

¹ ТОО «Сейсмологическая опытно-методическая экспедиция»,
Алматы, Республики Казахстан

² ТОО «Институт сейсмологии», Алматы, Республика Казахстан
E-mail: bayan_0106@mail.ru

Территория Северного Тянь-Шаня входит в систему сейсмоактивных поясов Евразии и характеризуется интенсивными геодинамическими процессами, одним из проявлений которых являются сейсмические события. На этой территории за последние 140 лет произошел ряд разрушительных землетрясений, два из которых (Чиликское 1889 г. и Кеминское 1911 г.) имеют магнитуду более 8. Уровень сейсмической активности ее остается высоким и в настоящее время. Подтверждением этого могут служить землетрясения с $M \geq 6.0$ (Жаланаш-Тюпское 1978 г., $M=6.8$; Зайсанское 1990 г., $M=6.8$; Байсорунское 1990 г., $M=6.3$ и др.), произошедшие здесь за последние годы.

По каталогу землетрясений территории Северного Тянь-Шаня, ограниченной координатами $41^{\circ}40'-45^{\circ}00'$ с.ш. и $75^{\circ}00'-80^{\circ}00'$ в.д., составленному по данным сети сейсмологических наблюдений ТОО «СОМЭ» Республики Казахстан за период 2015-2019 годы, зарегистрировано 18 981 землетрясений.

В пределах Северо-Тянь-Шаньского региона решения механизмов очагов получены для землетрясений начиная с $K=6$, что обусловлено наличием здесь плотной сети станций. Градация типов подвижек в очагах проведена по трем группам: взброс (взбросо-сдвиг), сброс (сбросо-сдвиг), сдвиг. В двух первых преобладают компоненты подвижек по падению плоскости разрыва, в последней – по простиранию. Исследованы, по материалам землетрясений всего энергетического диапазона, изменения параметра N_b/N_o , характеризующего отношение типичных для рассматриваемой территории взбросовых типов механизмов очагов к общему числу очагов. Анализировались среднегодовые вариации параметра в регионе.

В данной работе анализируются события, зарегистрированные за четыре года. Построены графики распределения количества событий, график повторяемости и сводная карта эпицентров землетрясений, механизмы очагов землетрясений и изменения параметра N_b/N_o за 2015-2019 гг.

Литература

- Жунусова Ж.К. Макросейсмическое исследование Текелийского землетрясения 13.06.2009 г. // Вест. Кокшетауского Технического института МЧС РК. 2011. Вып. 1.
- Полешко Н.Н., Досайбекова С.К. Сеймотектоническая обстановка по данным механизмов очагов землетрясений Джунгаро-Северо-Тянь-Шаньского региона Казахстана // Вестник АО «КазНИИСА». 2016. С. 25–34.
- Сыдыков А. Сейсмический режим территории Казахстана. Алматы: Гылым, 2004. 268 с.
- Masaki Nakamura. Determination of focal mechanism solution using initial motion polarity of P and S waves // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2002. V. 130. P. 17–29.

ОТ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ К СЕЙСМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ: ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, СЕЙСМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ И СЕЙСМОСТОЙКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Завьялов А.Д.¹, Перетокин С.А.^{1,2}

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

² Красноярский филиал – специальное конструкторско-технологическое бюро
«Наука», г. Красноярск, Россия

E-mail: zavyalov@ifz.ru; saperetokin@yandex.ru

(устный доклад)

В докладе рассматривается проблема существования человеческого общества в условиях сейсмической опасности и риска с точки зрения сейсмической безопасности, являющейся одним из существенных факторов более общей проблемы экологической безопасности.

Система сейсмической безопасности включает три блока: 1) оценка сейсмической опасности, включающая прогноз землетрясений и сейсмическое районирование; 2) сейсмостойкое строительство; 3) ликвидация последствий землетрясений. Чем более надёжно и корректно решаются задачи первого и второго блока, тем меньше нагрузка на третий, являющийся прерогативой экстренных служб федерального, регионального и локального уровней. Каждый из блоков содержит в себе широкий спектр задач и проблем. Кроме того, эффективное функционирование системы возможно только в случае отлаженной взаимосвязи между блоками.

Оценка сейсмической опасности, с точки зрения проектирования и строительства, это результат сейсмического районирования различного масштаба и степени детальности – общее сейсмическое районирование (ОСР), детальное сейсмическое районирование (ДСР) и сейсмическое микрорайонирование (СМР).

Прогноз сейсмической опасности как оценка ожидаемой магнитуды в заданном районе в фиксированный интервал времени в большей степени полезен в оперативном плане – эвакуация людей, остановка опасных производств, мобилизация служб ликвидации последствий и т.д. Подобный прогноз и по сей день остается сложной научной проблемой и благородной целью сейсмологии. Несмотря на усилия, предпринимаемые научным сообществом, точно предсказать время возникновения, место и силу очередных сейсмических толчков, а тем более предотвратить их, к сожалению, невозможно. С другой стороны, успешные прогнозы не избавят человечество от землетрясений; они будут причинять ущерб зданиям и сооружениям. Кроме того, даже в случае надежного прогноза, можно ли будет осуществить эвакуацию населения таких мегаполисов, как Токио, Сан-Франциско, Пекин, и даже городов с меньшей численностью – Петропавловск-Камчатский, Южно-Сахалинск?

Разрушения и число человеческих жертв могут быть уменьшены путем:

- проведения в сейсмоактивных районах разумной и долговременной государственной политики, основанной на повышении уровня осведомленности населения и федеральных органов об угрозе землетрясений;
- проектирования с учетом современных данных сейсмического районирования разного масштаба и степени детальности;
- последующего антисейсмического строительства такого качества, чтобы построенные объекты выдерживали натиск подземной стихии;
- последовательного выполнения мероприятий по оценке сейсмостойкости существующих объектов и проведению в случае необходимости сейсмоусиления их конструктивных элементов.

Существующие карты общего сейсмического районирования (ОСР) являются одной из основных составных частей соответствующих СНиП-ов (Сводов правил в современной терминологии нормативной документации) при проектировании зданий и сооружений в сейсмоопасных районах. Карты ОСР определяют вероятность превышения (или не превышения) заданного уровня сейсмических воздействий на поверхности земли на период в десятки и сотни лет. Однако для строительства конкретного объекта карт ОСР недостаточно. Необходимо проведение достаточно затратных мероприятий по ДСР (региональный уровень) и СМР (локальный уровень). К сожалению, в отличие от ОСР в России нет четких регламентов для выполнения ДСР и СМР. При их разработке необходимо принять во внимание, что все стадии сейсмического районирования (ОСР, ДСР, СМР) должны быть увязаны в единую технологическую цепочку.

В настоящее время многие страны перешли на использование вероятностных карт сейсмического районирования в физических характеристиках. На таких картах, как правило, картируются характеристики, которые далее используются при проектировании непосредственно для задания сейсмических нагрузок (например, пиковые ускорения PGA – проект GSHAP). Дискуссии о пересмотре картируемой величины на картах ОСР, как впрочем, и методических основ ее расчета, ведутся специалистами уже не первый год. При этом необходимо понимать, что комплект карт ОСР – это элемент нормативной базы по обеспечению сейсмостойкости проектируемых зданий и сооружений. Его кардинальное изменение влечет за собой пересмотр всей цепочки учета сейсмических нагрузок и, как следствие, всей линейки нормативных документов. Для перехода к картированию сейсмической опасности территории Российской Федерации в физических характеристиках сложились все предпосылки [Завьялов, 2018].

Карты ОСР (ДСР, СМР) необходимы не только для проектирования новостроек, но и для оценки сейсмической устойчивости большого числа зданий и сооружений, построенных десятки лет назад (паспортизация и т.п.). Эти объекты подвергались в процессе своей эксплуатации воздействию сильных землетрясений и вследствие этого утратили запас прочности, заложенный при их проектировании. Состояние их сейсмостойкости требует периодического контроля со стороны администрации сейсмоактивных регионов, что, в свою

очередь, требует выделения существенных дополнительных финансовых и материальных ресурсов. В Российской Федерации, основываясь на долгосрочных прогнозах академика С.А. Федотова для Камчатки и Курильских островов, принята (середина 2000-х годов) и реализуется программа по сейсмоусилению жилого фонда г. Петропавловск-Камчатский.

Таким образом, мы вплотную подходим к проблеме сейсмостойкого строительства вообще и его качества в частности. Что же мешает качественному строительству? Н. Амбрасейс и Р. Билхам [Ambraseys, 2011] считают, что мировая строительная индустрия – наиболее коррумпированный сегмент мировой экономики. К такому выводу они пришли, проанализировав зависимость числа погибших в разных странах в результате произошедших землетрясений от уровня коррупции и среднего дохода на душу населения. Из всех смертельных исходов землетрясений, связанных с разрушением зданий за три десятилетия (1980–2010), 82.6% приходится на общества, аномально подверженные коррупции. Коррупция убивает!

Работа выполнена в рамках программы государственного задания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН № АААА-А17-117051110250-6.

Литература

- Завьялов А.Д., Перетокин С.А., Данилова Т.И., Медведева Н.С., Акатова К.Н.* Общее сейсмическое районирование – от карт ОСР-97 к картам ОСР-2016 и картам нового поколения в параметрах физических характеристик // Вопросы инженерной сейсмологии. 2018. Т. 55. № 4. С. 47–68. DOI: 10.21455/VIS2018.4-4
- Ambraseys N., Bilham R.* Corruption kills // Nature. 2011. V. 469. P. 153–155. DOI: 10.1038/469153a

РАННЕЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Кислов К.В.¹, Гравиров В.В.^{1,2}

¹ *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики
РАН, г. Москва, Россия*

² *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия
E-mail: kvkisllov@yandex.ru*

(устный доклад)

Система раннего предупреждения о землетрясениях (Earthquake Early Warning System – EEWS) – один из самых действенных инструментов по снижению ущерба от землетрясений – предназначена для обнаружения события, определения его параметров и оповещения, если необходимы действия до прибытия разрушительной сейсмической энергии. Но время до разрушительной волны – это секунды, редко минуты.

При землетрясении до магнитуды 6 тревожный сигнал генерируется уже через 2 секунды. При более крупном событии оценка магнитуды растет со временем. EEWS не могут точно предсказать окончательный размер землетрясения и могут наблюдать только его развитие. Расчет интенсивности сотрясений на разных участках и оставшегося времени обновляется каждую секунду. Через 1–2 мин генерируется карта возможных повреждений, включая повреждения, вызванные вторичными эффектами (оползнями, лавинами и др.). Это случай хорошо построенной EEWS [Kislov, 2017].

Существуют различные стратегии построения EEWS [Gravirov, 2012]. По первой можно установить сеть недорогих сейсмометров, генерирующих тревожный сигнал по порогу S-волны, вокруг сейсмогенных разломов [Horiuchi, 2009]. По другой стратегии сейсмометры устанавливаются только на охраняемом объекте или вокруг него. В этом случае время предупреждения возникает из-за разницы в скоростях P- и S-волн. Наконец, можно раскинуть плотную сеть по всей территории. Главное, четко представлять, какие меры будут приняты в оставшееся время.

EEWS эксплуатируются или проходят тестирование в Японии, Мексике, на западном побережье США, в Турции, Китае, Румынии, Италии, Израиле и др. Однако это не означает полной надежности систем, отсутствия ошибок и мертвых зон, в которых предупреждение невозможно. Для уменьшения радиуса мертвой зоны разрабатываются более быстрые алгоритмы обработки сигналов и способов коммуникации [Hloupis, 2015; Kislov, 2017], используется пороговый метод по амплитуде P-волны [Kanamori, 2015; Wu, 2015]. Быстрое и точное определение магнитуды землетрясения, его гипоцентра, а следовательно, интенсивности землетрясения и времени его начала в конкретном месте становится возможным за счет уплотнения сети станций [Oliveira, 2015], за счет введения новых параметров оценки очага [Heidari, 2018; Chung, 2019], за счет оценки условий источника, трассы и площадки [Ogiso, 2016], за счет учета возможности нескольких одновременных землетрясений [Hoshiya, 2013], за счет борьбы с шумом [Kislov, 2011; Li, 2018] и т.д.

Большая часть территории России имеет сейсмичность, которая низка с глобальной точки зрения, но она обладает значительным разрушительным потенциалом. Каждые 10 лет на территории страны происходит 5–6 разрушительных землетрясений. Было организовано несколько систем, которые позиционировались как EEWS. Это участок железной дороги Беркамит–Томмот–Якутск, нефтеперекачивающие станции нефтепровода Восточная Сибирь – Тихий океан (ВСТО), объекты Олимпиады в Сочи и некоторые другие. Очевидно, что со временем все населенные районы Земли будут покрыты сетями EEWS. Первым шагом в этом в России будет защита критически важных объектов и сейсмоопасных районов. После построения системы несколько лет уходит на ее обучение и наладку [Кислов, 2017]. Поэтому важно как можно раньше начать накопление данных и апробацию методов.

Литература

- Кислов К.В., Гравиоров В.В. Система раннего предупреждения о землетрясении для железных дорог: перспективы, проблемы, решения // Научное приборостроение. 2017. Т. 27. № 1. С. 40–45. DOI: 10.18358/np-27-1-i4045
- Chung A.I., Henson I., Allen R.M. Optimizing Earthquake Early Warning Performance: ElarmS-3 // SRL. 2019. V. 90 (2). P. 727–743. DOI: 10.1785/0220180192
- Gravirov V.V., Kislov K.V. Development of a hybrid earthquake early warning system based on single sensor technique // NED University Journal of Research. 2012. V. 44. P. 1–20. <http://www.neduet.edu.pk/NED-Journal/pdf/12earthquakespaper1.pdf>
- Heidari R. τ_{ps} , a new magnitude scaling parameter for earthquake early warning // Bull Earthquake Eng. 2018. V. 16 (3). P. 1165–1177. DOI: 10.1007/s10518-017-0256-x
- Hloupis G., Vallianatos F. Wavelet-Based Methods for Rapid Calculations of Magnitude and Epicentral Distance: An Application to Earthquake Early Warning System // Pure Appl. Geophys. 2015. V. 172 (9). P. 2371–2386. DOI: 10.1007/s00024-015-1081-2
- Horiuchi S., Horiuchi Yu., Yamamoto Sh., Nakamura H., Wu Ch., Rydelek P.-A., Kachi M. Home seismometer for earthquake early warning // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. Article L00B04. DOI: 10.1029/2008GL036572
- Hoshiaba M. Real-time prediction of ground motion by Kirchhoff-Fresnel boundary integral equation method: Extended front detection method for Earthquake Early Warning // JGR Solid Earth. 2013. V. 118 (3). P. 1038–1050. DOI: 10.1002/jgrb.50119
- Kanamori H. Earthquake Hazard Mitigation and Real-Time Warnings of Tsunamis and Earthquakes // Pure Appl. Geophys. 2015. V. 172 (9). P. 2335–2341. DOI: 10.1007/s00024-014-0964-y
- Kislov K.V., Gravirov V.V. Earthquake arrival identification in a record with technogenic noise // Seism. Instr. 2011. V. 47 (1). P. 66–79. DOI: 10.3103/S0747923911010129
- Kislov K.V., Gravirov V.V. Use of Artificial Neural Networks for Classification of Noisy Seismic Signals // Seism. Instr. 2017. V. 53 (1). P. 87–101. DOI: 10.3103/S0747923917010054
- Li Z., Meier M.-A., Hauksson E., Zhan Zh., Andrews J. Machine Learning Seismic Wave Discrimination: Application to Earthquake Early Warning // Geophys. Res. Lett. 2018. V. 45 (10). P. 4773–4779. DOI: 10.1029/2018GL077870
- Ogiso M., Hoshiaba M., Shito A., Matsumoto S. Numerical Shake Prediction for Earthquake Early Warning Incorporating Heterogeneous Attenuation Structure: The Case of the 2016 Kumamoto Earthquake // Bull. Seismol. Soc. Am. 2016. V. 108 (6). P. 3457–3468. DOI: 10.1785/0120180063

- Oliveira C.S., Mota de Sá F., Lopes M., Ferreira M.A., Pais I.* Early Warning Systems: Feasibility and End-Users' Point of View // *Pure Appl. Geophys.* 2015. V. 172 (9). P. 2353–2370. DOI: 10.1007/s00024-014-0999-0
- Wu Y.M.* Progress on Development of an Earthquake Early Warning System Using Low-Cost Sensors // *Pure Appl. Geophys.* 2015. V. 172 (9). P. 2343–2351. DOI: 10.1007/s00024-014-0933-5

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СЕЙСМИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ХИБИНСКОГО МАССИВА ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ

Козырев А.А., Жукова С.А.

Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия

E-mail: svetlana.zhukowa@yandex.ru

(стендовый доклад)

Крупномасштабные горные работы, проводимые АО «Апатит» на протяжении 90 лет, существенно влияют на геодинамическую организацию обрабатываемых апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива, что подтверждается возрастающей во времени и пространстве сейсмичностью. При переходе на большие глубины резко ухудшаются условия эксплуатации месторождений, так как увеличивается горное давление, изменяются физико-механические свойства и структурная нарушенность массива горных пород. Негативные последствия такого дисбаланса – это переход от горных ударов к горно-тектоническим ударам и техногенным землетрясениям, их прогноз и профилактика являются актуальными задачами геомеханики, решить которые возможно лишь при комплексном анализе полученных результатов.

Ранее нами была установлена связь повышенной обводненности и резких перепадов температуры окружающей среды с увеличением сейсмичности в районе производственной деятельности АО «Апатит»; определены критические уровни значений по объемам водопритоков для весеннего и осеннего периодов и критические диапазоны значений углов спада высоты снежного покрова, после превышения которых наблюдается всплеск сейсмичности в виде сильного сейсмического события или серии событий.

В данной работе сопоставлены гидро-, метео- и сейсмические данные за длительный период мониторинга, проведена проверка критических значений после трехлетнего применения. В связи с тем, что постоянно меняется горно-техническая ситуация, рельеф поверхности: обнажаются новые системы трещин, вскрываются тектонические нарушения – изменяется и гидрогеологическая обстановка на исследуемых месторождениях: Кукисвумчоррское, Юкспорское, Апатитовый Цирк и Плато Расвумчорр. Представлены результаты ретро- и перспективного анализа данных для выявления периодов активизации сейсмичности с помощью разработанной программной системы, которая успешно применяется в службе прогноза и предотвращения горных ударов (ППГУ) Кировского филиала АО «Апатит».

За весь временной период с начала регистрации сейсмической эмиссии проанализирован сейсмический режим исследуемых месторождений Хибинского массива, выявлены причины изменения сейсмичности, установлены закономерности ее роста. Анализ сейсмических событий энергетического класса $K \geq 6$ за 17-летний период показал, что на смежных месторождениях Апатитовый Цирк и Плато Расвумчорр средние значения выделившейся сейсмической энергии выше, чем на других месторождениях. Это связано с общим повышенным уровнем напряженного состояния массива горных пород в пределах

этих отрабатываемых месторождений. Всплески сейсмической активности выпадают на те годы, когда были зарегистрированы техногенные землетрясения, горно-тектонические удары, толчки, а также прорастания трещин отрыва в консольной части массива пород висячего бока отрабатываемых месторождений. По местоположению гипоцентров большая часть событий приурочена к границам тектонических нарушений, очистному пространству, что обусловлено перераспределением напряжений в массиве. Большинство таких сейсмических событий происходит при совместном влиянии геологических и горно-технических факторов, обусловленных интенсивным ведением горных работ. Для снижения последствий динамического проявления горного давления на рудниках КФ АО «Апатит» выполняется непрерывная регистрация сейсмичности и по результатам анализа локализованных опасных зон отделами ППГУ принимается решение о необходимости проведения профилактических организационно-технических мероприятий, направленных на обеспечение безопасного ведения горных работ на данных участках.

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ

Козырев А.А., Журавлева О.Г.

*Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия
E-mail: zhuravlevaog@goi.kolasc.net.ru*

(стендовый доклад)

Горным институтом КНЦ РАН для условий удароопасных месторождений Хибинского массива разрабатывается комплексный подход к оценке сейсмической опасности, направленный на выявление участков массива горных пород, потенциально опасных по возникновению мощных сейсмических событий.

Подход основан на пространственно-временном вероятностном прогнозе сильных сейсмических событий (энергетический класс 6–8) при совместном использовании различных прогностических критериев. Применяются такие критерии, как фрактальный, концентрационный, наклон графика повторяемости сейсмических событий.

На основе данных сейсмических наблюдений за длительный период строятся 3D-карты вероятностей возникновения сильных сейсмических событий при наличии аномалии по прогностическому признаку, которые в некоторой степени можно считать районированием участков массива по типам сейсмичности в зависимости от особенностей проявления сильных сейсмических событий. В качестве прогностического признака рассматривается комплексный критерий, учитывающий поведение отдельных прогностических критериев, имеющих различный физический смысл и дополняющих друг друга. Карты вероятностей могут применяться для среднесрочного прогноза (для условий техногенной сейсмичности при интенсивном ведении горных работ такой период равен примерно 1 месяцу).

Для текущей оценки уровня сейсмической опасности строятся 3D-карты сейсмоактивных зон (также с учетом нескольких прогностических критериев). Изменение сейсмоактивных зон (их местоположение, конфигурация, динамика) отражает характер действующих напряжений в массиве в процессе ведения крупномасштабных горных работ. Совмещение карт вероятностей с картами сейсмоактивных зон для тех участков, где превышен уровень тревоги по комплексу прогностических критериев, позволяет локализовать потенциально опасные участки.

Результаты ретроспективных расчетов показывают хороший потенциал для применения комплексного подхода при интерпретации данных сейсмического мониторинга при отработке месторождений горнодобывающим предприятием.

СВИДЕТЕЛЬСТВА ПОСЛЕДНИКОВОЙ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЗАПАДНЫХ ХИБИН

Королева А.О.^{1,2}, Ивлева О.А.², Родкин М.В.³, Викулина М.А.⁴

¹ *Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго
Орджоникидзе, г. Москва, Россия*

² *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

³ *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики
РАН, г. Москва, Россия*

⁴ *Географический факультет Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

E-mail: koroleva.alyaska@yandex.ru

(стендовый доклад)

Как известно, сейсмическая активность Кольского полуострова достаточно слабая, это установлено в основном по данным современного сейсмического мониторинга, и оценки сейсмической опасности региона основываются на этих данных. Тем не менее, за последние десятилетия разными группами ученых были собраны и опубликованы важные материалы, которые дают основание говорить о высокой сейсмотектонической палеоактивности в этом регионе [Никонов, 2019]. Тектоническая структура Кольского региона обусловлена системой разнопорядковых блоков, которые подняты на разную высоту по молодым и возрожденным древним разломам [Николаева, 2018]. Наиболее представительные результаты удается получать на ярко выраженных характерных участках, где имеется возможность проводить комплексные исследования.

В докладе представлен комплекс палеосейсмических, геоморфологических и геофизических (зондирование становлением поля) данных по району ущелья Аку-Аку в западных Хибинах. Полевые исследования включали маршрутные наблюдения, подробное изучение и описание нарушений в скальных породах, фиксирование размеров и направленности обвалов (осыпей) с бортов ущелья. Специальное внимание уделено поиску и выделению признаков сейсмического воздействия (выбивания блоков, отщеления, сдвиги, зеркала скольжения, разрывы) (рис. 1). Геоморфологические исследования дополняются фотосъемкой ущелья с воздуха квадрокоптером DJI Mavic Pro. Также проведены лихенометрические наблюдения, включающие получение оценок максимальных диаметров лишайников вида *Rhizocarpon geographicum* на поверхностях квазивертикальной экспозиции на глыбах обвала, с целью ориентировочной оценки возраста возникновения этих обвалов. На прилегающем к ущелью с запада отроге с ровной вершинной поверхностью был проведен поиск и измерение величин блоковых смещений, построена многолепестковая гистограмма азимутов смещений, где выделяются три основные системы [Родкин, 2012].

В месте впадения ручья в ущелье Аку-Аку наблюдается вздернутая сухая долина, направленная поперек ущелья с востока на запад (рис. 2). По геоморфологическим наблюдениям можно заключить, что раньше ручей протекал по ней и являлся границей двух водоразделов. После образования разлома ручей повернул по ущелью на юг, что подтверждается геофизическими данными. В ущелье с места впадения ручья наблюдается

мощный проводящий слой, который можно интерпретировать как осадок, нанесенный ручьем в разлом. Выше, севернее озера Изумрудное, где ущелье сухое и более узкое, проводящего слоя не наблюдается. Геофизическая съемка была проведена прибором Tem-fast 48, с совмещенной генераторно-приемной петлей 25×25 м и током 1А. Измерения велись по трем поперечным к ущелью профилям и по двум продольным с целью выявления и изучения характера залегания проводящего слоя.

Данные в комплексе свидетельствуют о высокой послеледниковой сейсмотектонической активности данного региона.



Рис. 1. Отщеление блоков



Рис. 2. Расположение профилей ЗСБ

Литература

- Николаева С.Б., Никонов А.А., Шварев С.В., Родкин М.В. Детальные палеосейсмо-геологические исследования в бортовой зоне впадины оз. Имандра (Кольский регион): новые подходы и результаты // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 6. С. 866–880. DOI: 10.15372/GiG20180608
- Никонов А.А., Шварев С.В., Николаева С.Б., Зыков Д.С., Флейфель Л.Д., Родкин М.В., Королева А.О. Три активные сейсмотектонические зоны высшего ранга на севере Европейской части России: прогресс-репорт // Проблемы тектоники континентов и океанов. Материалы LI тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС, 2019. С. 86–92.
- Родкин М.В., Никонов А.А., Шварев С.В. Оценка величин сейсмических воздействий по нарушениям и смещениям в скальных массивах // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т. 3. С. 203–237. DOI: 10.5800/GT-2012-3-3-0072

СЕЗОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ НАВЕДЁННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В ОБЛАСТЯХ ЧИРКЕЙСКОГО И НУРЕКСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩ

Ленькова Е.Н.

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Кафедра физики Земли физического факультета, г. Москва, Россия
E-mail: en.lenkova@physics.msu.ru*

(стендовый доклад)

Наведённая сейсмичность, связанная с водохранилищами, обладает сезонными компонентами, возникающими, в том числе, из-за годовых вариаций уровня воды [Ленькова, 2018]. Сезонные компоненты представляют собой увеличение сейсмичности в зависимости от сезона. Величина сезонного отклика меняется во времени.

Механизмы возникновения сезонных компонент наведенной сейсмичности будем подразделять на «мгновенный» и «задержанный» отклики [Ленькова, 2018]. «Немедленный» («мгновенный») отклик – немедленная реакция среды на приложенное воздействие. «Задержанный» отклик – из-за диффузии воды (связан с понижением эффективной прочности в тех местах, куда проникла вода (при обводнении сухой среды) или дошла волна порового давления (при диффузии давления в обводненной среде) [Смирнов, 2018]). Обводнение образца, находящегося в напряженно-деформированном состоянии, инициирует развитие разрушения горной породы, т. е. чтобы был «мгновенный» отклик, порода должна быть насыщена водой. Значит, если порода сухая, то данный механизм работать не будет.

Проанализировано качество данных, изменение представительного класса каталогов. Сделано распределение сейсмичности по годам и месяцам.

В случае Чиркейского водохранилища в работе использовался каталог (general catalogue) детальных наблюдений сейсмичности района за 1962–2016 гг., а так же данные по уровню воды, что позволило:

- выделить наведённую сейсмичность;
- выявить сезонные компоненты: немедленный отклик – в августе и октябре, задержанный – в январе;
- закономерности изменения сезонных компонент сейсмичности выявить не удаётся.

В случае Нурекского водохранилища в работе использовался каталог (general catalogue) детальных наблюдений сейсмичности района за 1955–1988 гг., а так же данные по уровню воды:

- подтверждена наведённая сейсмичность;
- выявленные сезонные компоненты наиболее ярко выражены в период заполнения.

По-видимому, впервые обнаружено, что в начале заполнения водохранилища «задержанный» отклик появляется на два года раньше «мгновенного».

Сейсмичность при заливе Нурека бежит с юга на север по разлому за водой. Дальше сейсмичность аккумулируется вокруг водохранилища.

Учитывая механизмы «мгновенного» и «задержанного» откликов [Ленькова, 2018], полученный результат можно объяснить следующим образом:

– при первичном заполнении водохранилища среда в окрестности водохранилища должна «промокнуть»;

– первым появляется задержанный отклик, механизм которого связан с диффузией воды, что подтверждается миграцией наведенной сейсмичности по разломной структуре;

– мгновенный отклик, обусловленный модуляцией порового давления в насыщенной флюидом среде, появляется позже, после того, как среда в окрестности водохранилища «полностью промокла».

Проблема наведенной сейсмичности в наши дни становится одной из важнейших, и ей уделяется много внимания как в прикладной, так и в фундаментальной сейсмологии.

Благодарю моего научного руководителя Смирнова Владимира Борисовича и преподавателя Скоркину Анну Александровну.

Литература

Ленькова Е.Н. Сезонные компоненты наведённой сейсмичности: Бакалаврская работа. Кафедра физики Земли физического факультета, МГУ имени М.В. Ломоносова. 2018. 57 с.

Смирнов В.Б. Закономерности и природа переходных режимов сейсмического процесса: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова. 2018. 444 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРНЫХ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ МЕСТ ЛОКАЛИЗАЦИИ КРУПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МЕТАЛЛОВ В АЛТАЕ-САЯНСКОМ РЕГИОНЕ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

Ливинский А.И., Новикова О.В., Горшков А.И.

*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики
РАН, г. Москва, Россия
E-mail: artem@mitp.ru*

(стендовый доклад)

Цель работы – определение характерных геолого-геофизических признаков мест локализации крупных месторождений металлов в Алтае-Саянском регионе и выявление на их основе потенциально рудоносных структур. Задача решается математическими методами распознавания образов на основе установленной ранее связи месторождений металлов с морфоструктурными узлами в горных поясах Средиземноморья [Горшков, 2004; 2006]. В этих работах использовалась информация о месторождениях металлов, представленная на металлогенических картах, которые в разных странах составлены по различным принципам, и характеристики месторождений на этих картах не унифицированы. К настоящему времени созданы электронные базы данных месторождений мира, использование которых позволяет на новом качественном уровне исследовать корреляцию рудных месторождений с морфоструктурными узлами. В работе использована электронная база данных крупных и суперкрупных месторождений мира, созданная под руководством Д.В. Рундквиста в Государственном геологическом музее им. В.И. Вернадского РАН [Рундквист, 2004].

Исследование включало два этапа. Сначала было проанализировано положение крупных месторождений металлов в линеаментно-блоковой структуре изучаемого региона, которая определена в результате морфоструктурного районирования, выполненного с использованием геологических, геоморфологических данных и материалов дистанционного зондирования Земли. Установлена связь крупных и суперкрупных месторождений металлов Алтае-Саянского региона с узлами пересечения линеаментов. На втором этапе с помощью алгоритма распознавания образов КОРА-3 [Гельфанд, 1976] определены характерные геолого-геофизические и геоморфологические признаки узлов, в которых локализованы крупные месторождения металлов. Обучение алгоритма КОРА-3 было проведено по двум выборкам. Выборку **Р** (рудоносные узлы) составляли узлы, в которых известны месторождения металлов рассматриваемых размеров. В выборку **НР** (нерудоносные узлы) включались узлы, в которых в настоящее время месторождения рассматриваемых типов и размеров не известны. Характерные признаки узлов классов **Р** и **НР** определены алгоритмом КОРА-3 в результате анализа обучающих выборок. Потенциально рудоносные узлы определены на основе этих признаков. В результате проведенного распознавания узлы, в которых известны месторождения рассмотренных типов и размеров, были классифицированы как **Р** и определены семь узлов, которые по своим признакам схожи с рудоносными и могут рассматриваться как потенциально рудоносные.

Литература

- Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Кейлис-Борок В.И., Кнопоф Л., Пресс Ф., Раницман Е.Я., Ротвайн И.М., Садовский А.М.* Условия возникновения сильных землетрясений (Калифорния и некоторые другие регионы) // Исследование сейсмичности и моделей Земли. М.: Наука, 1976. С. 3–91.
- Горшков А.И., Соловьев А.А.* Определение характеристик рудоносных узлов методами распознавания образов // Крупные и суперкрупные месторождения: закономерности размещения и условия образования. М.: ИГЕМ РАН, 2004. С. 381–390.
- Горшков А.И., Соловьев А.А.* Распознавание облика рудных месторождений в поясе Тетис // Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых. В трех томах / Глобальные закономерности размещения / Ред. Д.В.Рундквист. М.: ИГЕМ РАН, 2006. Т. 1. С. 361–374.
- Рундквист Д.В., Ткачев А.В., Черкасов С.В., Гатинский Ю.Г., Вишневская Н.А.* База данных и металлогеническая карта крупных и суперкрупных месторождений мира: принципы составления и предварительный анализ результатов // Крупные и суперкрупные месторождения: закономерности размещения и условия образования. М.: ИГЕМ РАН, 2004. С. 391–422.

ИЗУЧЕНИЕ КОСЕЙСМИЧЕСКИХ И ПОСТСЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПО КОМПЛЕКСУ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Михайлов В.О.^{1,2}, Киселева Е.А.¹, Тимошкина Е.П.¹, Тимофеева В.А.^{1,4}, Шапиро Н.М.³,
Смирнов В.Б.^{2,1}, Хайретдинов С.А.¹

¹ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

² *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, г. Москва, Россия*

³ *Institut de Physique du Globe de Paris, Paris, France*

⁴ *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики
РАН, г. Москва, Россия*

E-mail: mikh@ifz.ru

(устный доклад)

В последние десятилетия спутниковые технологии все более широко применяются в науках о Земле, в том числе при изучении сейсмического цикла. Смещения земной поверхности фиксируются глобальными навигационными спутниковыми системами (GPS, Глонасс), а также спутниками, оснащенными антеннами с синтезированной апертурой (РСА интерферометрия или InSAR). Спутники ГРЕЙС поставляют данные об изменениях глобального гравитационного поля. Все эти данные используются, в частности, для построения модели поверхности косейсмического разрыва и поля смещений на ней, а также для изучения постсейсмических процессов. В докладе представлены результаты, полученные с использованием различных наземных и спутниковых данных.

Для области Олюторского землетрясения 20 апреля 2006 г., $M_w = 7.6$, которое произошло на юге Корякского нагорья, нами впервые построено поле косейсмических смещений по данным радарной спутниковой интерферометрии. Область основных смещений в направлении на спутник (“поднятия”) совпадает с областью, где располагаются эпицентры большинства афтершоков, на северо-запад от разрывов, обнаруженных в процессе наземных обследований. Для построения модели разрыва были использованы данные РСА интерферометрии и величины горизонтальных смещений на двух ближайших пунктах GPS. Полученная в результате решения обратной задачи модель поверхности разрыва имеет сложное строение. Она включает надвиг на обширной пологой поверхности, падающей на юго-восток, и систему правосторонних сдвигов. Такое строение согласуется с моделью очаговой зоны, предложенной в работе [Ландер, 2010].

Повышение точности и разрешающей способности ежемесячных моделей глобального гравитационного поля спутников ГРЕЙС, а также накопление 15-летней серии таких моделей, позволило выявить не исследованные ранее процессы, происходящие в областях крупных землетрясений. Временные вариации гравитационного поля в областях гигантских землетрясений, таких как Суматра-2004, Чили-2010, Тохоку-2011, включали косейсмический

скачок гравитационного поля, за которым следовали длительные постсейсмические изменения, в результате достигавшие почти такой же амплитуды. На уровне точности моделей ГРЕЙС косейсмические скачки гравитационного поля, сопровождающие события меньшей магнитуды (8.0–8.5), не регистрируются. Однако после целого ряда таких землетрясений в их областях обнаруживается длительный устойчивый рост гравитационного поля. Рост положительной гравитационной аномалии над океаническим желобом зафиксирован после землетрясений: Ниасского 03.2005 и Бенкулу 09.2007 в районе о. Суматра, у о. Хокайдо 09.2003, у о. Симушир 11.2006 и 01.2007 (Курильские острова) и у острова Самоа 09.2009 [Михайлов, 2016].

Особый интерес вызывает рост положительной аномалии гравитационного поля после Симуширского землетрясения 11.2006, который начался с задержкой в несколько месяцев после этого события. В это же время глубина афтершоков увеличилась с 20–30 км до 100 км и более, и произошло изменение направления и средней скорости горизонтальных смещений на пунктах региональной сети GPS. Это свидетельствуют о том, что данное землетрясение инициировало постсейсмические смещения в обширной области, которая простирается до глубин более 100 км. При этом вязкоупругая релаксация напряжений играет подчиненную роль, что и было показано нами путем численного моделирования с использованием данных о смещениях на пунктах GPS и о временных вариациях гравитационного поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Мегагранта Минобрнауки РФ 14.W03.31.0033 «Геофизические исследования, мониторинг и прогноз развития катастрофических геодинамических процессов на Дальнем Востоке РФ» и гранта РФФИ № 19-35-90092 «Исследование сейсмических и вулканических процессов на основе комплексной геодинамической интерпретации спутниковых и наземных данных».

Литература

- Ландер А.В., Пинегина Т.К.* Парадоксы очага Олюторского землетрясения 2006 г. – Глубинная структура и динамика. // Сб. Тр. Второй региональной научно-технич. конф. «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» / Отв. ред. В.Н. Чебров. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 131–135.
- Михайлов В.О., Диаман М., Любушин А.А., Тимошкина Е.П., Хайретдинов С.А.* Крупномасштабный асейсмический крип в областях сильных землетрясений по данным спутников ГРЕЙС о временных вариациях гравитационного поля // Физика Земли. 2016. № 5. С. 70–81.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ РЕГИСТРАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СИСТЕМ СЕЙСМОМОНИТОРИНГА РАЗНОЙ КОНФИГУРАЦИИ НА ПРИМЕРЕ УРАЛА И КЕНТЕРНБЕРИ

Мурыськин А.С.^{1,2}, Шулаков Д.Ю.², Скоркина А.А.³

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет,
г. Пермь, Россия

² Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия

³ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики
РАН, г. Москва, Россия
E-mail: muriskinas@gmail.com

(стендовый доклад)

Важной характеристикой качества сейсмологического мониторинга является информация о регистрационных возможностях сейсмической сети. Эта информация необходима для оценки возможности регистрации землетрясений малых магнитуд, а также для достоверной количественной оценки параметров сейсмичности.

Один из подходов к решению этой задачи основан на анализе сейсмических каталогов и станционных бюллетеней и является косвенным, так как определяется представительность каталога – результата обработки сейсмических записей [Смирнов, 1997]. Несмотря на высокую степень достоверности, подобный подход имеет существенные ограничения. В первую очередь, его использование затруднено на территориях с низким уровнем сейсмической активности, и он практически неприменим для проектирования новых мониторинговых систем, когда требуется провести прогнозный расчет [Шулаков, 2019].

Другой подход основан на сопоставлении амплитудно-частотных спектров микросейсмических шумов в месте установки станции и модельных спектров сейсмических событий [Kraft, 2013]. В реализуемом подходе очаговый спектр задан в рамках модели Брюна [Brune, 1970], а изменение формы спектра по мере продвижения фронта волны определяется добротностью среды Q . Калибровка амплитуд синтетических сейсмограмм для Уральского региона выполнена с помощью эмпирической зависимости максимальной скорости смещений частиц грунта от магнитуды и гипоцентрального расстояния:

$$\lg V = 0.903 \cdot M - 1.559 \cdot \lg R + 1.263$$

В Новой Зеландии рассматривался район Кентернбери и для калибровки использовалась зависимость из [Ristau, 2009].

Системы мониторинга Урала [Габсатарова, 2018] и Кентернбери [Petersen, 2011] близки по количеству велосиметров (17 и 15 станций соответственно), но существенно отличаются конфигурацией сети. Кроме того, при расчете регистрационных возможностей необходимо было учесть используемые частотные фильтры и уровень шумов на сеймостанциях. Для оценки амплитудно-частотных спектров микросейсмических шумов использовался временной интервал от 27.06.2019 и до 28.06.2019 для станций Урала (SYKR, GRV, SVUR, SOKR, PR1R, PR2R, PR7R, PR6R, PR0R, PR4R, PR3R, ARTI, SVE, KAUR, BA1R, ORR, OR2) и от 00:00 до 12:00 14.11.2016 для района Кентернбери (CVZ, RPZ, LTZ, WVZ, INZ, OXZ, GVZ, MQZ, ARCZ, WACZ, MHCZ, RACZ, AKCZ, OKCZ, AMCZ). По

полученным картам регистрационных возможностей для сейсмических сетей Урала и Кентернбери сделаны следующие выводы:

1) расположение станций сети мониторинга Уральского региона неравномерно (основная часть сосредоточена между городами Пермь и Березники), однако такая конфигурация позволяет регистрировать магнитуды M_L от 1 до 3, хотя область регистрации событий с M_L в диапазоне 1–1.5 по площади невелика по отношению к остальному региону;

2) велосиметры сети Geonet района Кентернбери распределены равномерно, и минимальные регистрируемые магнитуды в пределах рассматриваемой территории изменяются от 2–2.5 до 3.5. Таким образом, равномерность распределения сейсмостанций не позволяет регистрировать меньшие магнитуды в регионе.

Полученные результаты были сопоставлены с каталогами землетрясений для выбранных районов за 2016–2018 гг. и показывают высокую корреляцию между регистрационными возможностями сейсмических сетей и представительностью соответствующих каталогов.

Литература

- Габсатарова И.П., Голубева И.В., Дягилев Р.А., Карпинский В.В., Мехрюшев Д.Ю., Надежка Л.И., Нестеренко М.Ю., Петров С.И., Пивоваров С.П., Пойгина С.Г., Санина И.А., Французова В.И. Восточно-Европейская платформа, Урал и Западная Сибирь // Землетрясения России в 2016 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. С. 23–28.
- Смирнов В.Б. Опыт оценки представительности данных каталогов землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1997. № 4. С. 93–105.
- Шулаков Д.Ю., Мурыськин А.С. Спектральный подход к оценке регистрационных возможностей системы сейсмомониторинга Уральского региона // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XIV Международной сейсмологической школы. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 111.
- Brune J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. № 26. P. 4997–5009.
- Kraft T., Mignan A., Giardini D. Optimization of a large-scale microseismic monitoring network in northern Switzerland // Geophysical Journal International. 2013. № 195. P. 474–490.
- Peterson T., Gledhill K., Chadwick M. Gale N., Ristau J. The New Zealand National Seismograph Network // Seismological Research Letters. 2011. V. 82 (1). P. 9–20.
- Ristau J. Comparison of magnitude estimates for New Zealand earthquakes: moment magnitude, local magnitude, and teleseismic body-wave magnitude // BSSA. V. 99(3). P. 1841–1852.

ОБЩИЙ ЗАКОН ПОДОБИЯ ДЛЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ И АССОЦИИРОВАННЫХ РИСКОВ

Некрасова А.К., Кособоков В.Г.

*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики
РАН, г. Москва, Россия
E-mail: nastia@mitp.ru*

(устный доклад)

В отсутствие данных за многие тысячи лет вероятностные оценки повторяемости землетрясений и связанные с ними оценки сейсмической опасности и ассоциированных рисков в настоящее время остаются научно-несостоятельными. Подход, основанный на Общем законе повторяемости для землетрясений (ОЗПЗ), учитывает естественное фрактальное распределение их мест возникновения, а также данные о тектонике рассматриваемой территории и результаты распознавания образов [Nekrasova, 2002; Кособоков, 2004; Nekrasova, 2019].

Значения коэффициентов ОЗПЗ имеют пространственные и временные вариации, а также нетривиальные соотношения, представленные в докладе на примерах оценок по данным региональных каталогов автономной области Фриули-Венеция-Джулия в Италии [Nekrasova, 2018] и Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН [Некрасова, 2019]. Отметим, что вариации коэффициентов ОЗПЗ в целом описывают динамику сейсмического потока на территории рассмотрения. Долгосрочные оценки контрольного параметра ОЗПЗ, $\eta = N^{-1} \times 10^{B \times (S-M)} \times L^C$, кусочно-постоянны и в среднесрочном масштабе времени переключаются с одного относительно устойчивого уровня на другой в результате критического перехода. Как правило, столь значительные изменения значений η в масштабе региона сопровождаются возникновением сильных землетрясений.

ОЗПЗ позволяет дать оценку ожидаемой максимальной магнитуды землетрясения в местах их возникновения, что определяет возможность расчетов и картирования ожидаемых параметров сотрясений на территории исследуемого региона. С 2002 года по настоящее время карты повторяемости сейсмических событий с максимальной ожидаемой магнитудой построены для нескольких регионов мира с использованием глобальных или региональных каталогов сейсмических событий. Так, например, в работе [Nekrasova, 2015] картированы оценки сейсмической опасности и ассоциированных рисков на территории трех регионов разного масштаба (субконтинент, регион, область). Сравнение полученных в этой работе карт максимального возможного пикового ускорения (PGA) с картами вероятностных оценок сейсмической опасности проекта GSHAP [Giardini, 1999] указывает на то, что оценки на основе ОЗПЗ значительно превосходят результаты GSHAP в определении мест умеренных, сильных и значительных землетрясений.

В докладе методика построения карт сейсмической опасности и ассоциированных рисков приведена на примере Алтае-Саянского региона [Kosobokov, 2018]. Программное обеспечение для расчета параметров ОЗПЗ зарегистрировано [Некрасова, 2013]. Обзор применения методики с 2002 г. представлен в работе [Некрасова, 2020]. Очевидно, что при

практическом применении подхода для картирования сейсмической опасности и ассоциированных рисков требуется привлечение экспертов и специалистов для учета региональных особенностей землетрясений и сейсмического эффекта, а также реальных экономических и социальных факторов.

Литература

- Кособоков В.Г., Некрасова А.К.* Общий закон подобия для землетрясений: глобальная карта параметров // Анализ геодинамических и сейсмических процессов. М.: ГЕОС, 2004. С. 160–175. (Вычисл. сейсмология; Вып. 35).
- Некрасова А.К.* Программа оценки коэффициентов Общего закона подобия для землетрясений // SCE, 2013. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013618171 от 2 сентября 2013 г.
- Некрасова А.К., Кособоков В.Г.* Общий закон подобия для землетрясений: Камчатка // Геодинамические процессы и природные катастрофы тезисы докладов III Всероссийской научной конференции с международным участием / Отв. ред. Л.М. Богомолов. Южно-Сахалинск, 2019. С. 37.
- Некрасова А.К., Кособоков В.Г., Парвез И.А., Тао Х.* Общий закон подобия для землетрясений в приложении к оценке сейсмической опасности и ассоциированных рисков // Физика Земли. 2020. № 1. (В печати)
- Giardini D., Grünthal G., Shedlock K., Zhang P.* The GSHAP Global Seismic Hazard Map // Ann Geofis. 1999. V. 42 (6). P. 1225–1228.
- Kossobokov V.G., Nekrasova A.* Earthquake Hazard and Risk Assessment based on Unified Scaling Law for Earthquakes: Altai-Sayan Region // Natural Hazards. 2018. V. 93 (3). P 1435–1449. DOI: 10.1007/s11069-018-3359-z
- Nekrasova A., Kossobokov V.* Generalizing the Gutenberg-Richter scaling law // AGU Fall Meet. Suppl. Abstract NG62B-0958. EOS Trans. 2002. V. 83 (47).
- Nekrasova A.K., Kossobokov V.G.* Unified Scaling Law for Earthquakes: Global Map of Parameters // ISC's Seismological Dataset Repository. 2019. DOI: 10.31905/XT753V44
- Nekrasova A., Kossobokov V., Parvez I.A., Tao X.* Seismic hazard and risk assessment based on the unified scaling law for earthquakes // Acta Geod Geophys. 2015. V. 50 (1). P. 21–37. DOI: 10.1007/s40328-014-0082-4
- Nekrasova A.K., Kossobokov V.G., Peresan A.* Seismic Dynamics in Northeastern Italy 1995–2018 // Abstract S12B-02. Washington DC. 10–14 Dec. AGU, 2018. <https://agu.confex.com/agu/fm18/meetingapp.cgi/Paper/433069>

СЕЙСМИЧНОСТЬ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ АЛЯСКИ, СВЯЗЬ С СОВРЕМЕННОЙ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТЬЮ И ГЛУБИННЫМ ФЛЮИДНЫМ РЕЖИМОМ

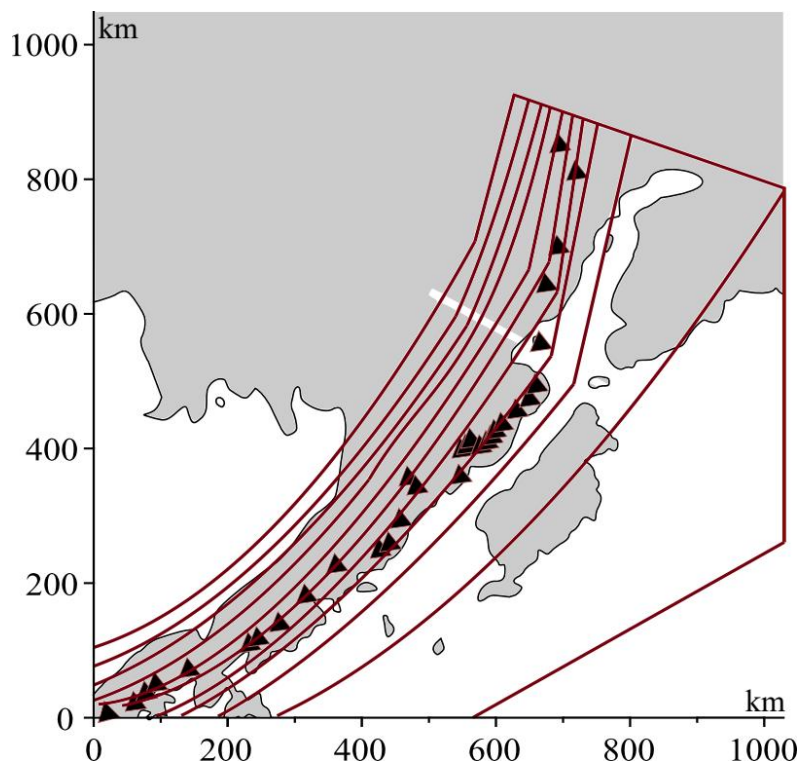
Никитина М.А., Родкин М.В.

Институт теории прогноза землетрясений и математической
геофизики РАН, г. Москва, Россия
E-mail: margarita@mitp.ru

(стендовый доклад)

Северная часть Алеутских островов и прилегающая часть Аляски это область с достаточно высоким развитием глубокой сейсмичности и вулканизма, а также с двойной зоной субдукции. По данным с сайта IRIS в данном регионе было зафиксировано свыше двух тысяч событий с магнитудой выше 4 и с глубиной до 250 км.

Существует гипотеза связывающая возникновение глубоких землетрясений с температурными изменениями пород, в частности с реакциями дегидратации, а также с современной вулканической сейсмичностью [Никитина, 2019]. В настоящей работе проведена обработка большого объема статистических данных по землетрясениям западной части Аляски и Алеутских островов с целью выяснения характера распределения землетрясений вблизи границы погружающейся плиты. Для того чтобы получить расстояния



Расположение профилей погружающейся океанической плиты для северной части Алеутских островов и прилегающей части Аляски. ▲ – обозначены вулканы.

до поверхности погружающейся плиты нами была построена ее трехмерная поверхность с помощью метода Кунса. Для этого были оцифрованы и аппроксимированы имеющиеся профили погружающейся плиты [Zhao, 1995; Martin-Short, 2018].

Положение землетрясений ниже рассматривается нами в координатах – расстояние от верхней границы погружающейся плиты – глубина гипоцентра. Само положение верхней границы погружающейся плиты характеризует глубинный тепловой и гидротермальный режим в области погружения океанической плиты [Калинин, 1989; Родкин, 1993]. По результатам анализа такого расположения землетрясений показана зависимость между формированием скоплений гипоцентров средне-глубинных землетрясений для двойной зоны субдукции и внутренними процессами метаморфизма внутри погружающейся плиты.

Литература

- Никитина М.А., Родкин М.В.* Сейсмичность зоны субдукции северного острова Новой Зеландии, связь с глубинным флюидным режимом и метаморфизмом // Физико-химические факторы петро- и рудогенеза: новые рубежи. Москва: ИГЕМ РАН, 2019. С. 133–137.
- Zhao D., Christensen D., Pulpan H.* Tomographic imaging of the Alaska subduction zone // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1995. Т. 100 (B4). С. 6487–6504.
- Martin-Short R., Allen R., Bastow I., Porritt R., Miller M.* Seismic imaging of the Alaska subduction zone: Implications for slab geometry and volcanism // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2018. Т. 19. № 11. С. 4541–4560.
- Калинин В.А., Родкин М.В., Томашевская И.С.* Геодинамические эффекты физико-химических превращений в твердой среде. М.: Наука, 1989. 158 с.
- Родкин М.В.* Роль глубинного флюидного режима в геодинамике и сейсмотектонике. М.: Нац. Геоф. Ком., 1993. 194 с.

ГЛОБАЛЬНАЯ ЕДИНСТВЕННОСТЬ В ПАССИВНОЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧЕ ГЕЛИОСЕЙСМОЛОГИИ

Новиков Р.Г.^{1,2}

¹ *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики
РАН, г. Москва, Россия*

² *École Polytechnique, Centre de Mathématiques Appliquées, France
E-mail: novikov@map.polytechnique.fr*

(устный доклад)

Рассматривается обратная задача восстановления сферически-симметричных скорости звука, плотности и поглощения на Солнце из наблюдений акустического поля, случайно возбуждаемого турбулентной конвекцией.

Мы показываем, что наблюдения на двух высотах над фотосферой и на двух частотах выше акустической частоты среза однозначно определяют солнечные параметры.

Мы также представляем численное моделирование, которое подтверждает этот теоретический результат.

Доклад основан на недавней совместной работе [Agaltsov, 2019].

Литература

Agaltsov A.D., Hohage T., Novikov R.G. Global uniqueness in a passive inverse problem of helioseismology // arXiv.org. 2019. Available at: <https://arxiv.org/abs/1907.05939>

АНАЛИЗ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ СТАНЦИЕЙ ЛОПУХИНКА

Панас Н.М.

*Федеральный исследовательский центр
«Единая геофизическая служба РАН», г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: natagold-86@inbox.ru*

(стендовый доклад)

Территория Санкт-Петербурга и прилежащих окрестностей относится к слабоактивным в сейсмическом отношении районам. В районе исследования сейсмическая активность известна лишь в районе Финского залива [Ассиновская, 2003].

Санкт-Петербургская сеть сейсмических станций, в которую входят 5 станций (VAL, VYB, IZM, PUL и LOPUX), регистрирует локальные сейсмические события, региональные взрывы и далекие землетрясения. Сейсмическая аппаратура на всех станциях установлена на коренных породах и, в основном, обеспечивает низкий уровень шумов, что обуславливает высокое качество получаемых данных [Карпинский, 2017].

Станция «Лопухинка» (LOPUX) была установлена в 2014 году в Ломоносовском районе Ленинградской области, в 26 км к югу от Финского залива, у одноименного поселка Лопухинка. Эта станция находится южнее всех остальных станций Санкт-Петербургской сети, что позволяет более точно локализовать сейсмические события, эпицентры которых находятся у южного берега Финского залива, у границы России с Эстонией, на территории Эстонии, а также для улучшения локализации в целом.

К сожалению, в процессе использования сейсмограмм станции LOPUX стало очевидно, что расположение ее выбрано не самым лучшим образом ввиду близко проходящей автодороги, что влечет за собой появление огромного количества дополнительных сейсмических сигналов (особенно в дневное время), усложняющих работу обработчиков.

Поскольку визуально запись машины в некоторых случаях можно спутать с сейсмическим событием другой природы, либо пропустить необходимое для регистрации событие на фоне машины, появилась необходимость в изучении подобного рода событий и сравнении их с более известными нам взрывами и землетрясениями. Основной задачей в данной работе являлось выделение полезного сигнала в присутствии машины на записях сейсмограмм, так как поиск тектонических событий, да и взрывов, затруднен в связи с высоким уровнем шума.

Поиск тектонических событий на территории Санкт-Петербургского региона является актуальной задачей в связи с тем, что имеется достаточное количество данных о современной сейсмичности данного региона и его окрестностей. К примеру, с 2014 по 2016 гг. Санкт-Петербургская сеть сейсмических станций зарегистрировала более 30 слабых

сейсмических событий с M_L от -0.6 до 2.1 и глубиной очага h от 0.6 до 2.1 км, эпицентры которых располагались на Карельском перешейке в районе действующего карьера Эркиля [Панас, 2017].

Для поставленной задачи были отобраны записи машин, взрывов и землетрясений, записанных станцией LOPUX. Очаговые параметры взрывов и землетрясений частично были взяты на финском сайте Института Сейсмологии Университета Хельсинки [сайт <http://www.helsinki.fi/>]. Записи автотранспорта выбраны исключительно в ночное время во избежание эффекта наложения записей от нескольких источников. Далее с использованием различных методик были получены данные отдельно по каждой группе событий (взрывы, землетрясения, машины), проведен спектральный анализ сейсмических волн в программных комплексах WSG и Micronoise, построены спектрограммы в программе Geotool, выявлены некоторые сходства и различия между событиями. Установлено, что записи машин, как правило, возбуждают высокие частоты, что хорошо иллюстрируется спектрограммами. Проведен поляризационный анализ, в результате чего стало более очевидно, что волны от машин – это поверхностные волны, имеющие эллиптическую поляризацию. Исследование амплитудных спектров смещения взрывов на фоне машин и без них, с сопоставимыми магнитудами в каждой группе, показало следующее: на фоне машин такие спектры энергетически более выражены и характеризуются достаточно яркими максимумами. Спектрограммы взрыва на фоне машины характеризуются увеличением спектральной плотности в высокой полосе частот на горизонтальных компонентах.

Литература

- Ассиновская Б.А., Никонов А.А.* Сейсмичность Карельского региона // Глубинное строение и сейсмичность Карелии / Под ред. Н.В. Шарова. Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра РАН, 2003. С. 192–237.
- Карпинский В.В., Мунирова Л.М., Панас Н.М., Карпинская О.В.* Сейсмологические наблюдения на северо-западе РФ // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 175–178.
- Панас Н.М., Ассиновская Б.А.* Тектонические события на Карельском перешейке // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ГС РАН, 2017. С. 259–263.
- Institute of Seismology (University of Helsinki) [Сайт]. URL: <http://www.helsinki.fi/>.

СТАБИЛЬНАЯ МОДИФИКАЦИЯ ЗАКОНА ПОВТОРЯЕМОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЁ ПРИМЕНЕНИЯ В СЕЙСМОРАЙОНИРОВАНИИ

Писаренко В.Ф., Родкин М.В., Рукавишникова Т.А.

*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики
РАН, г. Москва, Россия
E-mail: rodkin@mitp.ru*

(устный доклад)

Предложена новая составная модель распределения магнитуд землетрясений, статистически удовлетворительно описывающая их распределение как в диапазоне слабых и умеренных землетрясений (закон Гутенберга-Рихтера), так и в области сильнейших событий (обобщенный закон Парето, являющийся одним из предельных законов теории экстремальных значений). На примере Японии и Курил (по данным GСMT каталога) показано, что модель достаточно хорошо описывает сейсмичность в кругах, содержащих не менее 80 основных событий в диапазоне уверенной регистрации $m \geq 5.3$. Требование по числу событий задает статистическое ограничение на разрешающую способность предлагаемой модели. Для указанных регионов это ограничение допускает надежную оценку параметров сейсмичности для областей радиусом 300 км по сетке $2^\circ \times 2^\circ$. Использование указанной модели дает теоретическую базу как для большей робастности результатов оценки сейсмичности, так и лучшего пространственного разрешения, приближающегося к масштабу карт общего сейсмического районирования.

ГЕТЕРОКЛИНИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ В ГЕОФИЗИКЕ И ГИДРОДИНАМИКЕ

Подвигина О.М.

*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики
РАН, г. Москва, Россия
E-mail: olgap@mitp.ru*

(устный доклад)

Гетероклинический цикл – это инвариантное множество динамической системы $\dot{x} = f(x)$, состоящее из стационарных состояний (или других подмножеств более общего вида), соединенных гетероклиническими траекториями. В системах общего положения гетероклинических циклов нет, т. к. гетероклинические траектории, соединяющие седловые стационарные состояния, неустойчивы относительно произвольных малых возмущений $f(x)$. В некоторых ограниченных классах динамических систем гетероклинические циклы могут оказаться структурно устойчивыми относительно возмущений, принадлежащих к данному классу, например, из-за существования инвариантных подпространств динамической системы.

Траектории вблизи гетероклинического цикла проводят около стационарных состояний (или других инвариантных подмножеств) долгое время, а переходы между состояниями происходят существенно быстрее – такое временное поведение называется перемежаемостью.

Перемежаемость характерна, в частности, для течений в атмосфере Земли, изменений климата, рассмотренных на больших интервалах времени, эволюции биологических видов, поведения магнитного поля Земли и многих других физических и природных явлений. В докладе приведено несколько примеров систем, в которых наблюдается перемежаемость, порожденная гетероклиническими циклами.

Инверсии магнитного поля Земли. Современное магнитное поле Земли имеет вид диполя, ось которого почти параллельна оси вращения Земли. Согласно палеомагнитным исследованиям, геомагнитное поле испытывает инверсии, при которых южный и северный магнитные полюса меняются местами. Продолжительность интервалов постоянной полярности составляет от десятков тысяч лет до десятков миллионов лет, а сами инверсии происходят за несколько тысяч лет. Последняя инверсия произошла около 780 тысяч лет назад [Merril, 1996]. Инверсии магнитного поля также наблюдаются в экспериментах [Berhanu, 2007; Petrelis, 2010].

Источник магнитного поля Земли – конвективное течение во внешнем ядре. Инверсии связаны с наличием у оператора магнитной индукции симметрии $\mathbf{B} \rightarrow -\mathbf{B}$: из существования аттрактора с некоторым ненулевым средним \mathbf{B} следует существование симметричного аттрактора. Если при изменении параметров системы такой аттрактор становится неустойчивым, то может возникнуть гетероклиническая траектория, соединяющая два бывших аттрактора. Этот сценарий был предложен в работе [Podvigina, 2003], где инверсии \mathbf{B} найдены в системе, состоящей из уравнения Навье-Стокса с силой Лоренца и уравнения магнитной индукции.

Конвекция Рэлея-Бенара. Рассмотрим горизонтальный слой жидкости, подогреваемый снизу и вращающийся относительно вертикальной оси. Поведение системы зависит от чисел: Рэлея Ra , пропорционального разности температур на границах, Тейлора Ta , пропорционального квадрату скорости вращения, и Прандтля P , характеризующего свойства жидкости. При малых Ra жидкость неподвижна. С увеличением Ra в системе при достаточно больших P и малых Ta возникающее течение имеет вид валов: оно двумерно, т. е. скорость зависит только от двух координат. С увеличением Ta возникающие конвективные валы неустойчивы относительно таких же валов, повернутых относительно вертикальной оси на некоторый угол (т. наз., неустойчивость Кюпперса-Лортца [Küppers, 1969]). В пределе $P \rightarrow \infty$ угол между двумя течениями вида валов (возмущаемым и возмущением) близок к $\pi/3$.

Гетероклинический цикл, отвечающий этой неустойчивости, наблюдается в экспериментах: в некоторой области слоя жидкости (горизонтальные размеры которого существенно превышают толщину слоя) присутствуют долгоживущие квази-постоянные валы, изредка быстро замещаемые аналогичными валами, повернутыми на угол $\pi/3$ [Aurnou, 2001].

Изменения климата Земли на больших временах. Исследование изменений климата Земли на временах порядка миллионов лет показало наличие длительных интервалов времени, на которых средние температуры и крупномасштабное распределение температур на Земле меняется мало, и относительно коротких интервалов, в течение которых и происходит изменение климата. В северном полушарии похолоданиям предшествовали короткопериодные колебания температуры (т. наз., осцилляции Дансгора-Эшгера). В работе [Crucifix, 2012] была рассмотрена гипотеза, что это поведение связано с наличием гетероклинического цикла, и показано существование такого цикла в предложенных моделях земного климата.

Литература

- Aurnou J.M., Olson P.L. Experiments on Rayleigh-Bénard convection, magnetoconvection and rotating magnetoconvection in liquid gallium // J. Fluid Mech. 2001. V. 430. P. 283–307.
- Berhanu M., Monchaux R., Fauve S., Mordant N., Pétrélis F., Chiffaude A., Daviaud F., Dubrulle B., Marié L., Ravelet F., Bourgoin M., Odier Ph., Pinton J.-F., Volk R. Magnetic field reversals in an experimental turbulent dynamo // Europhys. Lett. 2007. V. 77. Article 59001. 5 p.
- Crucifix M. Oscillators and relaxation phenomena in Pleistocene climate theory // Phil. Trans. R. Soc. A. 2012. V. 370. P. 1140–1165.
- Küppers G., Lortz D. Transition from laminar convection to thermal turbulence in a rotating fluid layer // J. Fluid Mech. 1969. V. 35. P. 609–620.
- Merril R.T., McEllhiny M.W., McFadden Ph.L. The magnetic field of the Earth. Paleomagnetism, the core and the deep mantle. San Diego: Academic Press, 1996. 527 p.
- Pétrélis F., Fauve S. Mechanics for magnetic field reversals // Phil. Trans. R. Soc. A. 2010. V. 368. P. 1595–1605.
- Podvigina O. A route to magnetic field reversals: an example of an ABC-forced non-linear dynamo // Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics. 2003. V. 97. P. 149–174.

ОБОБЩЕННАЯ ОКРЕСТНОСТЬ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ, ПРИЛОЖЕНИЕ К ФИЗИКЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ПРОГНОЗУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Родкин М.В.

*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики
РАН, г. Москва, Россия
E-mail: rodkin@mitp.ru*

(устный доклад)

Результаты построения и анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения, благодаря накоплению уникально большого объема данных, позволяют, кроме детального описания типичной (средней) интенсивности потока фор- и афтершоков, выявить типовую аномалию, проявляющуюся для значительного числа различных характеристик сейсмического режима и нарастающую к моменту обобщенного сильного события как минус логарифм времени до момента этого землетрясения. Обсуждается возможность интерпретации характера аномалии в рамках различных подходов к описанию сейсмического режима. Указанная аномалия, в частности, проявляется в уменьшении средней глубины фор- и афтершоков, что может отвечать наличию в очаговой зоне флюидной фазы и прорыву ее в верхние горизонты при развитии трещиноватости при сильном землетрясении. Развитие перечисленных аномалий прослеживается за срок около 100 дней до момента обобщенного сильного землетрясения; таким образом «прогноз» обобщенного сильного землетрясения вполне тривиален. Возможно, это указывает на возможность также и прогноза единичных сильных землетрясений при значительном росте объема и разнообразия используемых при прогнозе данных.

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ АРКТИКИ ПО ДАННЫМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

Середкина А.И.^{1,2}

¹ *Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия*

² *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, г. Троицк, Россия*

E-mail: ale@crust.irk.ru

(стендовый доклад)

В работе проведено исследование крупномасштабных неоднородностей верхней мантии Арктики методом поверхностно-волновой томографии по данным о дисперсии групповых скоростей волн Рэлея и Лява. Материалом для исследования служили записи поверхностных волн от сильных ($M_w > 5.0$) удаленных землетрясений на каналах LHZ и LHT цифровых широкополосных сейсмических станций сетей IRIS, GEOSCOPE, GEOFON, GLISN. Всего было использовано 38 землетрясений, зарегистрированных с 1996 по 2015 гг. Дисперсионные кривые групповых скоростей фундаментальных мод поверхностных волн в диапазоне периодов от 10 до 250 с рассчитывались с помощью процедуры спектрально-временного анализа [Левшин, 1986]. Всего было получено 1555 дисперсионных кривых для волн Рэлея и 1265 для волн Лява.

Карты распределений групповых скоростей были рассчитаны методом двумерной томографии для случая сферической поверхности [Yanovskaya, 2003]. Всего было построено по 18 карт для каждого типа поверхностных волн с переменным по периоду шагом. Разрешение результатов картирования оценивалось путем вычисления эффективного радиуса осреднения. Наилучшим разрешением (400–600 км) характеризуется центральная часть области исследования (севернее 70° с.ш.), а также северо-восток Евразии и Аляска. На периферии, особенно в южной Гренландии и Канаде, эффективный радиус осреднения принимает более высокие значения.

Полученные распределения групповых скоростей поверхностных волн [Середкина, 2019] отражают основные крупномасштабные особенности строения коры и верхней мантии Арктики. Для более детального исследования региона и установления глубины залегания выявленных неоднородностей по результатам картирования в заданных с учетом разрешения точках области исследования были вычислены локальные дисперсионные кривые групповых скоростей поверхностных волн и проведена их инверсия в скоростные разрезы S-волн. Расчет параметров моделей среды, удовлетворяющих локальным дисперсионным кривым, осуществлялся с помощью минимизации невязок между теоретическими и экспериментальными значениями групповых скоростей методом сопряженных градиентов [Яновская, 2015]. Процедура инверсии дисперсионных кривых волн Рэлея и полученные результаты (3D модель распределения скоростей SV-волн в мантии до глубины 500 км) подробно описаны в работе [Seredkina, 2019].

Анализ распределения скоростей S-волн показывает, что максимальные вариации скоростей наблюдаются в интервале глубин до 220 км, где выявленные аномалии тесно

связаны с геологическим строением области исследования. Так, максимальные значения скоростей SV-волн (до 4.8 км/с) приурочены к Канадскому щиту и Восточно-Европейской платформе. Несколько меньшими скоростями (4.6–4.7 км/с) характеризуется литосфера Сибирской платформы и Балтийского щита, при этом обе структуры имеют неоднородное строение. Наиболее интенсивные минимумы на картах в диапазоне глубин 50–220 км наблюдаются под складчатыми поясами Чукотки и Аляски и, вероятно, обусловлены субдукцией Тихоокеанской плиты. Низкие значения скоростей под Исландией и к северу от нее могут быть объяснены влиянием Исландского плюма и мантийного плюма под островом Ян-Майен, а также спрединговыми процессами.

Предварительные результаты инверсии дисперсионных кривых волн Лява и расчета коэффициента вертикальной анизотропии показывают, что анизотропные свойства в верхней мантии Арктики наблюдаются до глубины около 400 км с максимум до 220 км. Максимальными значениями коэффициента вертикальной анизотропии (~4%) характеризуются океанические бассейны, минимальными (~1%) – стабильные континентальные структуры (щиты и платформы). Выявлены области с отрицательной вертикальной анизотропией ($V_{SH} < V_{SV}$).

Автор выражает глубокую благодарность проф. Т.Б. Яновской (СПбГУ) за предоставленное программное обеспечение и обсуждение результатов работы.

Литература

- Левшин А.Л., Яновская Т.Б., Ландер А.В., Букчин Б.Г., Бармин М.П., Ратникова Л.И., Итс Е.Н.* Поверхностные сейсмические волны в горизонтально-неоднородной Земле. М.: Наука, 1986. 278 с.
- Середкина А.И.* Поверхностно-волновая томография Арктики по данным дисперсии групповых скоростей волн Рэлея и Лява // *Физика Земли*. 2019. Т. 3. С. 58–70. DOI: 10.31857/S0002-33372019358-70
- Яновская Т.Б.* Поверхностно-волновая томография в сейсмологических исследованиях. СПб.: Наука, 2015. 167 с.
- Seredkina A.* S-wave velocity structure of the upper mantle beneath the Arctic region from Rayleigh wave dispersion data // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2019. V. 290. P. 76–86. DOI: 10.1016/j.pepi.2019.03.007
- Yanovskaya T.B., Kozhevnikov V.M.* 3D S-wave velocity pattern in the upper mantle beneath the continent of Asia from Rayleigh wave data // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2003. V. 138. P. 263–278.

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ЛИТОСФЕРЫ СЕВЕРНОГО ПРИБАЙКАЛЬЯ ПО ГЕОМАГНИТНЫМ, ГЕОТЕРМИЧЕСКИМ И СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Середкина А.И.^{1,2}, Голубев В.А.¹, Филиппов С.В.²

¹ *Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия*

² *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В.Пушкова РАН, г. Троицк, Россия*

E-mail: sfilip@izmiran.ru

(устный доклад)

Одним из важных параметров, рассматриваемых для изучения строения литосферы, является распределение температуры с глубиной. Как известно, температурный режим земных недр может быть косвенно оценен с помощью нескольких подходов. В первую очередь, распределение температуры с глубиной может быть рассчитано по данным о тепловом потоке на поверхности с учетом некоторых априорных представлений о глубинном строении среды. Одним из очевидных недостатков такого метода является малое количество измерений теплового потока в большинстве регионов Земли. Определенную информацию о температуре можно получить по распределению глубин очагов землетрясений, учитывая, что температура на нижней границе сейсмоактивного слоя составляет около 350°C [Sibson, 1984]. Однако такой подход применим лишь для сейсмоактивных областей, где расположение сети сейсмических станций позволяет определять глубины гипоцентров с небольшими погрешностями. В последнее время, с развитием спутниковых измерений геомагнитного поля, наиболее универсальным методом решения названной проблемы признается геомагнитный. При его использовании определяется глубина центра масс верхней и нижней границ литосферных магнитных источников. Последняя соответствует глубине точки Кюри, ниже которой ферромагнитные минералы переходят в парамагнитное состояние. Для континентов основным магнитным минералом, входящим в состав литосферы, является титаномагнетит, температура точки Кюри которого составляет 580°C [Яновский, 1978].

В данной работе температурный режим литосферы северо-восточного фланга Байкальского рифта и сопредельных территорий Сибирской платформы и Забайкалья (50°–63°с.ш., 110°–122°в.д.) рассмотрен с применением всех перечисленных выше подходов. Расчеты глубины точки Кюри проводились на основании анализа азимутально-усредненных Фурье-спектров мощности литосферного магнитного поля Земли [Tanaka, 1999], заданного глобальной моделью WDMAM 2.0 [Lesur, 2016]. Средние распределения температуры с глубиной для рассматриваемых структур вычислялись по данным о поверхностном тепловом потоке в предположении 1D кондуктивного теплопереноса с учетом генерации тепла радиоактивными источниками в верхней части земной коры [Голубев, 2007]. Мощность сейсмоактивного слоя для северо-восточного фланга Байкальского рифта оценивалась по каталогу землетрясений Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН (2010–2018 гг.) и результатам наших последних исследований очаговых параметров региональных землетрясений средних магнитуд по поверхностным сейсмическим волнам.

В результате было получено, что глубина точки Кюри в пределах рассматриваемой территории уменьшается в южном направлении и составляет в среднем 35 км под Сибирской платформой, 33 км под Байкальским рифтом и 31 км под Забайкальем. Для Забайкалья, наиболее равномерно покрытого измерениями теплового потока и характеризующегося его средним значением ~ 56 мВт/м², наблюдается хорошая согласованность геомагнитных и геотермических данных, т.к. согласно полученному температурному распределению температура 580°C достигается на глубине 30 км. Для Байкальского рифта хорошо согласуются между собой сейсмологические и геомагнитные данные: мощность сейсмоактивного слоя в среднем равняется 19 км, т.е. приблизительно соответствует рассчитанной нами глубине центра масс литосферных магнитных источников. Однако для Байкальского рифта (43 мВт/м²) и Сибирской платформы (41 мВт/м²) положение точки Кюри, рассчитанное по геотермическим данным, должно быть более глубоким, чем по геомагнитным. Возможные причины такого несоответствия обсуждаются в работе: неравномерное распределение и малое количество измерений теплового потока; влияние конвективного теплопереноса и перераспределения тепла подземными водами; влияние многолетнемерзлых пород.

Литература

- Голубев В.А.* Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2007. 222 с.
- Яновский Б.М.* Земной магнетизм. Л.: Ленинградский университет, 1978. 592 с.
- Lesur V., Hamoudi M., Choi Y., Dyment J., Thébault E.* Building the second version of the World Digital Magnetic Anomaly Map (WDMAM) // *Earth Planets Space*. 2016. V. 68 (1). P. 1–13.
- Tanaka A., Okubo Y., Matsubayashi O.* Curie point depth based on spectrum analysis of the magnetic anomaly data in East and Southeast Asia // *Tectonophysics*. 1999. V. 306. P. 461–470.
- Sibson R.H.* Roughness at the base of the seismogenic zone: Contributing factors // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89. № B7. P. 5791–5799.

СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТАДЖИКИСТАНА

Улубиева Т.Р., Маматкулова З.С.

*Геофизическая служба Академии наук Республики Таджикистан, г. Душанбе,
Республика Таджикистан
E-mail: zarrina_mt@mail.ru*

(стендовый доклад)

Сейсмическая сеть современных цифровых станций Геофизической службы Таджикистана введена в эксплуатацию с октября 2005 года при содействии фирмы «Нанометрикс» (Канада) и поддержке Швейцарского Агентства по Развитию и Сотрудничеству (ШАРС). В настоящее время проводятся непрерывные сейсмологические наблюдения по регистрации землетрясений Таджикистана и сопредельных государств в широком диапазоне энергетических классов цифровыми широкополосными сейсмическими станциями: Чуянгарон, Гарм, Игрон, Шаартуз, Гезан, Манем, Чорухдаррон и Симиганч. По результатам обработки данных составляются оперативные бюллетени землетрясений Таджикистана и приграничных зон с $K \geq 9.6$ ($M \geq 3.1$) и годовые каталоги с $K \geq 5$ ($M \geq 0.3$).

Для решения практических задач, связанных с продолжением строительства каскада гидроэлектростанций на реке Вахш, на базе существующей опорной сети создается локальная сеть из 11 цифровых широкополосных станций в районе верхнего и среднего течения реки. С 2005 г. осуществляется сейсмический мониторинг Нурекско-Рогунского полигона. Создаваемая система предназначена для более детального изучения наведенной сейсмичности, влияния создаваемого каскада водохранилищ и уточнения максимально возможного землетрясения. Создаваемая система мониторинга должна обеспечить детальными сейсмологическими и геофизическими данными. Система должна регистрировать землетрясения с $M \geq 0.2$ с точностью определения координат 200 м, глубину – с точностью до 400 м. Такая точность необходима для изучения блокового строения района верхнего и среднего течения реки Вахш; изучения и прогнозирования наведенной сейсмичности в связи с предстоящим продолжением строительства Рогунской ГЭС и заполнением крупного водохранилища; изучения влияния механических вибраций на сейсмичность и т.д.

Такие данные позволят контролировать напряженное состояние земной коры в районе водохранилища, определить оптимальный режим заполнения и разработать меры по уменьшению риска от провоцированных землетрясений.

С октября 2016 года началось поэтапное заполнение Рогунского водохранилища, в ноябре 2018 года был запущен первый агрегат Рогунской ГЭС и получены первые данные о влиянии заполненного водохранилища на сейсмичность.

Для оценки влияния создаваемых водохранилищ собраны и проанализированы из различных источников все имеющиеся каталоги локального Душанбино-Вахшского района (ДВР) с 1955 года по настоящее время.

Собран и систематизирован весь макросейсмический материал о сильных коровых землетрясениях, произошедших на территории Таджикистана, и глубокофокусных Памиро-Гиндукушских землетрясениях за период с 1895г. по настоящее время.

Достаточно высокая чувствительность цифровых станций позволила эффективно использовать ее для регистрации не только землетрясений, взрывов, но и сейсмосигналов, производимых вторжением в атмосферу Земли крупных, достигающих метровых и более размеров, космических тел – болидов. Такая работа по регистрации светового и сейсмического возмущения, сгенерированного полетом и взрывом в атмосфере Земли суперболида, наблюдавшегося в Таджикистане, проведена совместно с сотрудниками Института астрофизики АН Республики Таджикистан.

Система дает возможность оперативного обмена данными с соседними государствами с целью уменьшения ущерба от трансграничных землетрясений, а участие в международном обмене способствует развитию решению актуальных сейсмологических задач.

Результаты исследований по мониторингу публикуются в ежегодном сборнике «Землетрясения Северной Евразии», Обнинск, ГС РАН в соответствии с Межправительственным соглашением стран СНГ. Первичные данные сети доступны всем заинтересованным в реальном режиме времени благодаря сотрудничеству с IRIS.

ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ЗАПИСЯМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

Фомочкина А.С.^{1,2}, Букчин Б.Г.¹

¹ *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики
РАН, г. Москва, Россия*

² *Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М.
Губкина, г. Москва, Россия
E-mail:nastja_f@bk.ru*

(устный доклад)

Методы определения параметров очагов землетрясений, которые мы рассматриваем, основаны на интерпретации сейсмических волн, зарегистрированных станциями мировой сейсмической сети. Наиболее интенсивные смещения земной поверхности, регистрируемые сейсмическими станциями, наблюдаются в поверхностных волнах. Каждая из таких волн является результатом свертки соответствующей функции Грина, определяемой строением среды вдоль пути распространения волны, с тензором избыточных напряжений, характеризующего неупругие процессы, происходящие в очаге землетрясения [Backus, 1976]. При расчете функции Грина мы используем модель среды со слабой горизонтальной неоднородностью [Woodhouse, 1974; Бабич, 1976]. Скорости поверхностных волн в реальной Земле известны с достаточной точностью лишь для периодов, превышающих 100–150 с. Поэтому, как правило, мы используем для определения параметров источника лишь амплитудные спектры поверхностных волн, включая в рассмотрение их фазовые спектры лишь на очень длинных периодах. Заменяв функцию Грина ее рядом Тейлора по времени и по пространственным координатам в окрестности источника, можно представить спектр смещений в поверхностной волне в виде бесконечной суммы интегральных пространственно-временных моментов тензора избыточных напряжений с соответствующими производными функции Грина в качестве коэффициентов. Для низких частот эти коэффициенты убывают, и можно учитывать лишь несколько первых членов ряда.

Анализируя самую длиннопериодную часть спектра, мы описываем процесс в очаге в приближении тензора момента. Мы рассматриваем мгновенную точечную сдвиговую дислокацию (двойной диполь) на глубине h . Такой источник задается пятью параметрами: его глубиной, фокальным механизмом, определяемым тремя углами (простираения, падения и подвижки), и сейсмическим моментом M_0 . Четыре первых параметра мы определяем прямым перебором их возможных значений на сетке в параметрическом пространстве, а пятый параметр M_0 – минимизируя отличия (невязку) наблюдаемых амплитудных спектров от их теоретических значений для каждой текущей комбинации значений остальных параметров. Использование метода прямого перебора в случае достаточно высокой детальности требует значительных затрат компьютерного времени. Нами было предложено применение параллельных вычислений для ускорения расчета параметров [Фомочкина, 2019].

Переходя к анализу спектров поверхностных волн на более коротких периодах, мы описываем источник вторыми моментами тензора избыточных напряжений, рассматривая уже модель плоского сдвигового источника, который задается через 6 следующих

параметров: интегральную оценку продолжительности действия источника, интегральные оценки длин большой и малой осей очага, угол между направлением большой оси и направлением простирания, абсолютное значение средней скорости мгновенного пространственного центра и угол между направлением его скорости и направлением простирания. Если все характеристики среды, глубина эквивалентного мгновенного точечного источника и его тензор сейсмического момента известны (например, определены из анализа спектров поверхностных волн на более длинных периодах), а также одна из нодальных плоскостей идентифицирована как плоскость разлома (данная проблема была исследована нами в работе [Букчин, 2017]), то для любой комбинации значений определяемых шести параметров могут быть рассчитаны амплитудные спектры поверхностных волн для всех точек регистрации. Значения параметров, минимизирующие невязку между рассчитанными значениями спектров и наблюдаемыми, мы принимаем за оценки этих параметров. Вид же функции невязки для каждого параметра характеризует его разрешение.

Предлагаемые методики были успешно применены для изучения различных землетрясений.

Литература

- Бабич В.М., Чихачев Б.А., Яновская Т.Б.* Поверхностные волны в вертикально-неоднородном упругом полупространстве со слабой горизонтальной неоднородностью // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1976. № 4. С. 24–31.
- Букчин Б.Г.* Описание очага землетрясения в приближении вторых моментов и идентификация плоскости разлома // Физика Земли. 2017. № 2. С. 76–83. DOI: 10.7868/S0002333717020041
- Фомочкина А.С., Букчин Б.Г.* Применение параллельных вычислений при определении параметров очагов землетрясений с высоким разрешением // Физика Земли. 2019. № 2. С. 68–75. DOI: 10.31857/S0002-33372019268-75
- Backus G., Mulcahy M.* Moment tensors and other phenomenological descriptions of seismic sources. Pt.1. Continuous displacements // Geophys. J. R. Astr. Soc. 1976. V. 46. P. 341–362.
- Woodhouse J.H.* Surface waves in the laterally varying structure. // Geophys. J. R. Astr. Soc. 1974. V. 90 (12). P. 713–728.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ МГУ ПРИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Хажаев Р.Р.

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Кафедра физики Земли физического факультета, г. Москва, Россия
E-mail: rr.khazhaev@physics.msu.ru*

(стендовый доклад)

Частота собственных колебаний является одной из важнейших характеристик здания. Она определяется типами материалов, из которых построено сооружение, их физическими свойствами, геометрической формой конструкции и свойствами связей, параметрами фундамента и основания, на котором он располагается. Устойчивое изменение частоты вследствие внешних воздействий может свидетельствовать о структурном изменении физических свойств конструкции, изменении его прочности. Лучшее понимание явлений, происходящих со зданиями после постройки в результате внешних воздействий, может позволить улучшить качество их строительства и предупредить обрушения или повреждения, особенно опираясь на современный подход к проектированию и эксплуатации зданий с учётом BIM-технологий [Astorga, 2018].

Целью работы являлось определение наличия или отсутствия влияния внешних факторов на изменение частоты первой изгибной моды собственных колебаний (СК) на больших удалениях от эпицентра землетрясения.

С целью изучения влияния внешних воздействий на частоту СК высотного здания МГУ на Воробьёвых горах проанализированы данные с высокочувствительного сейсмического оборудования, расположенного на высоте 70 м (17-й этаж) и 95 м (23-й этаж). Эти данные сопоставлены с сейсмическими событиями (каталог USGS) за 2010–2018 гг., которые включили в себя землетрясения с магнитудой от 6 и выше по всему миру и с магнитудой от 5 и выше на расстоянии 2000 км от Москвы, а также с ветровыми воздействиями в периоды со скоростью ветра в порыве свыше 15 м/с (данные метеорологической обсерватории МГУ). Из сейсмических событий выбраны те, которые удовлетворяли созданному критерию отбора для амплитуды сейсмических волн: 5 событий по миру и 6 событий в радиусе 2000 км от Москвы.

Для определения динамики изменения частоты СК высотного здания МГУ создана программа, где методом Юла-Уолкера [Марпл, 1990] сигнал разбивается на оптимальное число окон и число точек (nfft) для получения наилучшей разрешающей способности по частоте при относительно небольшом размере окна. Каждый исследуемый сигнал перед спектральным анализом был профильтрован с помощью фильтра Баттерворта 4-го порядка.

Для сейсмических воздействий было установлено, что частота СК высотного здания МГУ уменьшается на время воздействия и восстанавливается к исходному значению при затухании этого воздействия. Из этого можно сделать вывод о том, что землетрясения не оказывают долгосрочного влияния на конструктивные элементы здания. Для ветровых воздействий частота СК также уменьшается и возвращается к исходному значению после

окончания действия ветра. Помимо прочего было установлено сезонное изменение частоты СК высотного здания МГУ, при котором частота летом была в среднем на 0.02 Гц выше, чем зимой [Хажяев, 2019].

В итоге можно сделать вывод, что частота первой изгибной моды СК здания уменьшается при внешних динамических воздействиях. Уменьшение частоты совпадает с временем наибольшего воздействия. Очевидно, что эти воздействия не оказывают существенного влияния на здание. Однако как данные об уменьшении частоты СК при внешних динамических воздействиях, так и данные о годовых изменениях частоты СК могут быть использованы для уточнения вычислительных моделей сооружений.

Автор искренне благодарен своему научному руководителю кандидату физико-математических наук, доценту Алексею Юрьевичу Марченкову за постановку интересной задачи и помощь в подготовке бакалаврской работы.

Литература

- Хажяев Р.Р., Марченков А.Ю.* Спектральные характеристики колебаний высотного здания Московского государственного университета при метеорологических и сейсмических воздействиях. Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. Физический факультет. Бакалаврская работа. 2019.
- Astorga A., Gueguen Ph., Kashima T.* Nonlinear elasticity observed in buildings during a long sequence of earthquakes // Bulletin of the Seismological Society of America. 2018. V. 108 (3A). P. 1185–1198.
- Марпл С.Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. / Пер. О.И. Хабарова, Г.А. Сидоровой / Ред. И.С. Рыжак. М.: Мир, 1990. 265 с.

МЕТОД ОЦЕНКИ МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНОЙ МАГНИТУДЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ ГЛАВНОГО ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Хачикян Г.Я.¹, Садыкова А.Б.², Инчин А.С.³

¹ Институт ионосферы, г. Алматы, Казахстан

² Институт сейсмологии, г. Алматы, Казахстан

³ Институт космической техники и технологий, г. Алматы, Казахстан

E-mail: galina.khachikyan@gmail.com

(стендовый доклад)

Для размещения особо ответственных стратегических сооружений, например, объектов атомной энергетики, обычно выбирают сейсмически спокойные внутриконтинентальные территории. Однако периоды повторяемости сильных внутриконтинентальных землетрясений могут составлять сотни и более лет, что может привести к ошибке типа пропуска цели, когда в районах, где прогнозировались слабые сейсмические события, происходят сильные землетрясения. В этой связи представляется целесообразным иметь некоторые дополнительные способы оценки сейсмического потенциала конкретного региона, возможно даже без использования сейсмической информации.

В работе [Khachikyan, 2012] было показано, что землетрясения возникают наиболее часто в тех регионах планеты, где геомагнитная Z-компонента (Z_{GSM}), рассчитанная на земной поверхности в геоцентрической солнечно-магнитосферной системе координат, имеет большие положительные значения, что в основном имеет место для области широт $\sim 30^\circ N$ – $30^\circ S$. Также было показано, что максимально возможные магнитуды землетрясений (M_{max}) коррелируют с логарифмом абсолютного значения Z_{GSM} , которое можно рассчитать для координат эпицентра в момент сейсмического события по модели [Tsyganenko, 2008] (заметим, что значения Z_{GSM} имеют ярко выраженные пространственно-временные вариации). Этот результат демонстрирует рисунок 1а, где показано распределение магнитуд землетрясений, зарегистрированных на планете в 1973–2010 гг. в зависимости от $\{\text{Log}[\text{abs}(Z_{GSM})]\}$. Черная ломаная линия есть огибающая максимальных магнитуд (M_{max}) для последовательных бинов $\{\text{Log}[\text{abs}(Z_{GSM})]\} = 0.15$, а красная линия есть линейная аппроксимация огибающей уравнением регрессии [Khachikyan, 2012]:

$$M_{max} = a + b \{\text{Log}[\text{abs}(Z_{GSM})]\}, \quad (1)$$

где $a = 5.22 \pm 0.17$, $b = 0.78 \pm 0.06$, с коэффициентом корреляции $R = 0.91$, со среднеквадратическим отклонением $SD = 0.56$, с вероятностью $P = 95\%$.

Коэффициенты регрессионного выражения (1) могут быть уточнены для конкретных географических регионов. Например, на рисунке 1б показано распределение в зависимости от $\{\text{Log}[\text{abs}(Z_{GSM})]\}$ энергетических классов землетрясений (K), начиная с $K \geq 7.0$, произошедших в 1970–2010 гг. на локальной особо сейсмоактивной территории Северного Тянь-Шаня, ограниченной координатами 42.83° – $43.5^\circ N$, 76° – $78^\circ E$ (1061 событие). Крестики в красных кружках маркируют сейсмические события с максимальным энергетическим классом (K_{max}), а прямая линия есть их аппроксимация уравнением линейной регрессии:

$$M_{max} = (5.4 \pm 0.13) + (2.46 \pm 0.05) \{ \text{Log}[\text{abs}(Z_{GSM})] \} \quad (2)$$

с коэффициентом корреляции $R = 0.999$, $SD = 0.01$, $P = 95\%$.

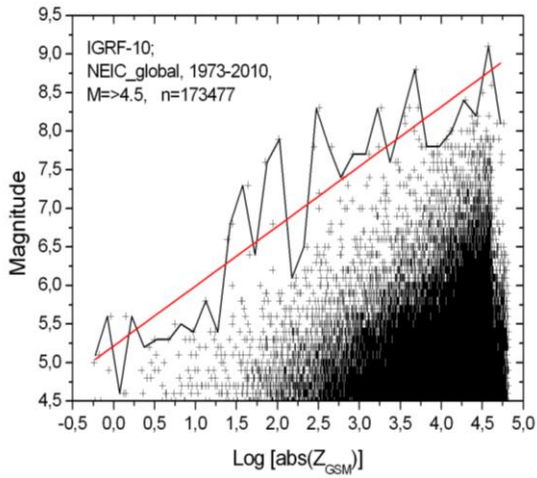


Рис. 1a

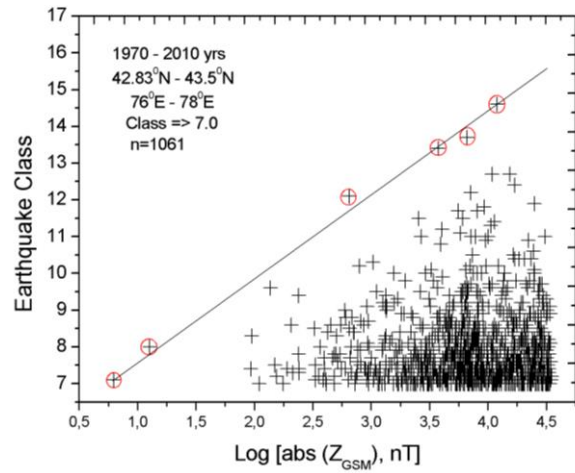


Рис. 1b

Апробация регрессионного выражения (2) была проведена при оценке сейсмopotенциала (M_{max}) на площадке размещения Банка НОУ МАГАТЭ на объекте «Ульба» ($50^{\circ}15' N$; $83^{\circ}22' E$, Казахстан). При оценке сейсмopotенциала Ульбинской сейсмогенерирующей зоны по сейсмологическим, геолого-геофизическим данным и результатам дешифрирования космоснимков получена величина $M_{max} = 6.0$. При оценке сейсмopotенциала по геомагнитным данным получено наиболее вероятное значение $M_{max} = 6.1$, но поскольку величина Z_{GSM} изменяется с сезоном и временем суток, возможно, хотя и с малой вероятностью, значение $M_{max} = 7.2$.

Литература

- Khachikyan G., Inchin A., Lozbin A. Spatial distribution of seismicity: relationships with geomagnetic Z-component in geocentric solar magnetospheric coordinate system // International Journal of Geosciences. 2012. V. 3 (5). P. 1084–1088. DOI:10.4236/ijg.2012.35109
- Tsyganenko N.A. Geopack: A Set of Fortran Subroutines for Computations of the Geomagnetic Field in the Earth's Magnetosphere. 2008. <http://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/Geopack-2008.html>

ЗАКОН ПРОДУКТИВНОСТИ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ

Шебалин П.Н.¹, Баранов С.В.², Корчак П.А.³, Жукова С.А.⁴

¹ *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики
РАН, г. Москва, Россия*

² *Кольский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Апатиты,
Россия*

³ *Кировский филиал АО «Апатит», г. Кировск, Россия*

⁴ *Горный институт ФИЦ КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия
E-mail: bars.vl@gmail.com*

(устный доклад)

Рассматривается способность техногенных землетрясений вызывать последующие толчки. На примере Хибинской природно-технической системы (ПТС) показано, что число инициированных толчков, продуктивность, с магнитудами не ниже порога ΔM , заданного относительно магнитуды события-триггера ($M \geq M_m - \Delta M$), подчиняется экспоненциальному распределению, а не распределению Пуассона, как обычно предполагается [Kagan, 1981; Ogata, 1989; Helmstetter, 2002]. При этом вид распределения зависит от магнитуд и глубин рассматриваемых событий. Данный результат согласуется с аналогичным законом продуктивности, установленным нами ранее для тектонических землетрясений на глобальном и региональном уровнях [Баранов, 2019], расширяя выполнение этого закона на более низкие масштабы энергий сейсмических событий $\sim 10^4$ Дж ($M \geq 0$).

Дополнительно исследовалась сейсмическая продуктивность взрывов, характеризующая их способность вызывать последующие толчки. Показано, что число инициированных взрывами толчков с магнитудами не ниже относительного порога также подчиняется экспоненциальному распределению.

Совпадение вида распределений для сейсмических событий и взрывов позволяет предположить, что продуктивность определяется свойствами среды и не зависит от механизма воздействия (взрыв, сейсмическое событие).

Исследование проведено по данным сети сейсмического мониторинга Кировского филиала (КФ) АО «Апатит» [Корчак, 2014] за период с 1996 по июль 2019 г. Представительность каталога в указанный период не превышает нуля.

Для выделения цепочек инициированных событий на различных уровнях иерархии использовался метод ближайшего соседа [Zaliapin, 2016] с функцией близости [Baiesi, 2004] по времени-пространству-магнитуде, зависящей от параметров сейсмического режима, которые определялись по представительным сейсмическим событиям. Пороговое значение расстояния (η_0) до «предка» (события или взрыва), начиная с которого «предок» является триггером, определялось модельно независимым методом [Баранов, 2019], основанным на рандомизации каталога и декомпозиции расстояний от сейсмических событий до триггеров на кластеризованную и независимую части.

Исследование включает результаты, полученные при поддержке РФФИ (проект № 19-05-00812).

Литература

- Баранов С.В., Шебалин П.Н. Закономерности пост-сейсмических процессов и прогноз опасности сильных афтершоков. М.: Наука, 2019. (В печати)
- Корчак П.А., Жукова С.А., Меньшиков П.Ю. Становление и развитие системы мониторинга сейсмических процессов в зоне производственной деятельности АО «Апатит» // Горный журнал. 2014. № 10. С. 42–46.
- Baiesi M., Paczuski M. Scale-free networks of earthquakes and aftershocks // Phys. Rev. E. 2004. V. 69 (6). P. 066106-1–066106-8. DOI: 10.1103/PhysRevE.69.066106
- Helmstetter A., Sornette D. Subcritical and supercritical regimes in epidemic models of earthquake aftershocks // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2002. V. 107. ESE-10. DOI: 10.1029/2001JB001580
- Kagan Y.Y., Knopoff L. Stochastic synthesis of earthquake catalogs // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 2853–2862. DOI: 10.1029/JB086iB04p02853
- Ogata Y. Statistical models for standard seismicity and detection of anomalies by residual analysis // Tectonophysics. 1989. V. 169. P. 159–174. DOI: 10.1016/0040-1951(89)90191-1
- Zaliapin I., Ben-Zion Y. A global classification and characterization of earthquake clusters // Geophys. J. Int. 2016. V. 207. P. 608–634. DOI: 10.1093/gji/ggw300

НОВЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ В СЕЙСМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Шебалин П.Н.

*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики
РАН, г. Москва, Россия
E-mail: shebalin@mitp.ru*

(устный доклад)

Традиционное исследование сейсмического режима направлено на решение задач оценки сейсмической опасности. Но закономерности сейсмического режима отражают также и физику сейсмогенеза. Мы исследуем особенности хорошо известных законов Гутенберга-Рихтера и Омори в различных условиях. Степенной характер распределения сейсмического момента (экспоненциальное распределение магнитуды – закон Гутенберга-Рихтера) нарушается в областях ускоренного асейсмичного скольжения. В таких зонах наблюдается излом графика повторяемости, при этом его наклон в области меньших магнитуд не меняется. Для афтершоков землетрясений также установлены новые закономерности. Задержка начала степенного характера спада активности афтершоков во времени (закон Омори) зависит от напряжений, накопленных в области очага основного землетрясения. В частности, это подтверждается регулярными зависимостями величины задержки от механизма очага и от глубины. Установлен степенной закон распределения продуктивности афтершоков. Параметр этого распределения сильно зависит от глубины. Закон продуктивности хорошо объясняет форму распределения разности магнитуд основного толчка и сильнейшего афтершока (закон Бота) и его зависимость от времени.

ЛУННО-СОЛНЕЧНЫЕ ПРИЛИВЫ И СЕЙСМИЧНОСТЬ ПРИБАЙКАЛЬЯ

Щепалина П.Д.¹, Кособоков В.Г.^{1,2}, Некрасова А.К.¹

¹ *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия*

² *Парижский институт физики Земли, г. Париж, Франция*
E-mail: pollina95@mail.ru

(стендовый доклад)

В геодинамике роль земных приливов может иметь важное значение для понимания пространственно-временных характеристик сейсмического потока. С ростом сейсмической истории инструментальных наблюдений и расширением территории регистрации землетрясений появилась возможность статистической проверки гипотез о связи сейсмической активности с земными приливами. Наличие дополнительного касательного напряжения в астеносфере, вызванного лунными или солнечными приливами, может способствовать возникновению землетрясений. Вероятно, при учете влияния приливных сил можно рассматривать ослабление эффективного трения между литосферой и мантией [Riguzzi, 2010; Doglioni, 2015]. Горизонтальная составляющая твердого прилива поляризована из-за смещения внутренней структуры Земли, которая может обеспечить достаточный сдвиг литосферы. Вертикальная составляющая генерирует колебания статической нагрузки литосферы, которые могут вызвать землетрясения при разломах в критическом состоянии. Отметим, что влияние лунно-солнечных приливов на процессы в иерархической системе разломов-и-блоков литосферы зависит от конкретной тектонической обстановки в регионе. Изучение вариаций параметров земных приливов в масштабах региона представляется актуальной задачей современной сейсмологии.

В работе [Kosobokov, 2019] при глобальном рассмотрении всех сильнейших землетрясений с $M \geq 8.0$ и $M \geq 7.5$ за 1900–2018 годы сделан вывод о том, что статистика этих событий не позволяет отвергнуть нулевые гипотезы о их случайном возникновении в любой день Солнечного (Юлианский День, JD) или Лунного (фаза Луны, MP) циклов. Однако для сильных событий с магнитудой $M \geq 6.0$, произошедших в Северном полушарии за последние 40 лет, непараметрический тест Кёйпера позволяет отвергнуть эти нулевые гипотезы с вероятностями 98% и 99% соответственно.

Статистика критерия Кёйпера [Kuiper, 1960; Stephens, 1965], κ , не предполагает специальный класс распределений, чувствительна к различиям в форме функций распределения и инвариантна относительно циклических преобразований, что делает этот критерий особенно ценным, если наблюдения являются точками на окружности. Рассмотрим эмпирическую кумулятивную функцию распределения $F_n(x)$ для n независимых одинаково распределенных наблюдений X_i , определенных как $F_n(x) = \{\text{число } X_i \leq x\}/n$. Двухвыборочный тест Кёйпера оценивает несоответствие двух распределений, учитывая разницу $V = D^+ - D^-$ между обеими статистиками расхождений $D^+ = \max(F_{1,n}(x) - F_{2,m}(x))$ и $D^- = \min(F_{1,n}(x) - F_{2,m}(x))$ в определении $\kappa(D, n, m) = [nm/(n+m)]^{1/2}V$. Асимптотически, когда

n и $m \rightarrow \infty$, совокупное распределение вероятностей κ сходится к вероятности $\text{Prob}(\kappa \leq x) = 1 - 2 \sum_{k=1}^{\infty} (4k^2 x^2 - 1) \exp(-2k^2 x^2)$.

Когда вероятность превышения достигнутого значения статистики меньше, чем α , нулевая гипотеза отвергается на уровне значимости α . С точки зрения уровня достоверности $1-\alpha$ нулевая гипотеза отклоняется, если $\text{Prob}(\kappa \leq x) > 1-\alpha$.

Непараметрическая статистика критерия Кёйпера для циклических вариаций применена к сейсмическим данным Прибайкалья, которые ежегодно пополняются и доступны на сайте БФ ФИЦ ЕГС РАН (<http://seis-bykl.ru>). А именно, эмпирические распределения времен возникновения землетрясений в диапазонах магнитуд $M \geq 4.5$, $M \geq 4.0$, $M \geq 3.5$, $M \geq 2.8$, зарегистрированных региональной сетью Байкальского филиала ГС РАН в периоды (1) 01.01.1982–31.12.1997 и (2) 01.01.1994–31.12.2018 в наиболее сейсмически активной части региона $51^\circ\text{--}57^\circ$ с.ш. $99^\circ\text{--}122^\circ$ в.д., рассмотрены относительно Лунного и Солнечного циклов. Оба временных интервала полны для землетрясений с энергетическим классом $K \geq 9$, что соответствует магнитуде $M \geq 2.8$.

В таблице представлены результаты теста Кёйпера, полученные для четырех магнитудных интервалов двух каталогов на рассматриваемой территории. Для временного интервала 1982–1997 гг. и всех магнитудных диапазонов значения теста не позволяют отвергнуть нулевую гипотезу как для МР, так и для JD. Для временного интервала 1994–2018 гг. распределения событий с $M \geq 2.8$ для МР и JD позволяют с уверенностью отвергнуть гипотезу случайного возникновения сейсмических событий в периоды Лунного и Солнечного циклов. Это утверждение сохраняется на сокращенной выборке для $M \geq 3.5$ для МР и JD, а в случае JD и для $M \geq 4.0$, тогда как для МР отрицание нулевой гипотезы становится достоверным лишь на уровне 92%.

Таблица. Значения теста Кёйпера для сейсмичности Прибайкалья в области $51^\circ\text{--}57^\circ$ с.ш. $99^\circ\text{--}122^\circ$ в.д.

Данные			МР			JD		
Интервал времени	M	N	V_N	$\kappa(\alpha) = V_N \times N^{1/2}$	α	V_N	$\kappa(\alpha) = V_N \times N^{1/2}$	α
1982–1997	≥ 2.8	1394	0.05	1.69	0.07	0.04	1.32	0.35
	≥ 3.5	292	0.07	1.12	0.64	0.07	1.13	0.63
	≥ 4.0	99	0.11	1.11	0.78	0.09	0.93	0.90
	≥ 4.5	35	0.16	0.91	0.91	0.22	1.27	0.49
1994–2018	≥ 2.8	3634	0.07	3.93	<0.01	0.08	4.90	<0.01
	≥ 3.5	830	0.07	2.04	0.01	0.12	3.49	<0.01
	≥ 4.0	296	0.10	1.64	0.08	0.14	2.47	<0.01
	≥ 4.5	101	0.10	1.04	0.86	0.19	1.85	0.04

Число среднегодовых зарегистрированных сейсмических событий для двух рассмотренных временных интервалов в 15 лет и 24 года имеет соотношение примерно в 1.5 раза. Улучшение регистрации за последние годы, а также изменения в параметрах

сейсмической сети Прибайкалья в начале 90-х годов XX века может служить возможным объяснением отсутствия выраженных признаков влияния лунных или солнечных приливов для временного интервала 1982–1997 гг. Отметим, что величина расхождения функций распределения (статистика V_N) сопоставима для соответственных магнитудных диапазонов из двух временных интервалов, однако для более короткого интервала времени (каталог 1) размер выборки землетрясений, по-видимому, оказался недостаточным для утверждения о статистической значимости отличия от случайных, равномерных распределений по лунным и солнечным циклам.

Литература

- Dogliani C., Panza G.* Chapter One - Polarized Plate Tectonics // *Advances in Geophysics*. 2015. V. 56. P. 1–167. DOI: 10.1016/bs.agph.2014.12.001
- Kuiper N.H.* Tests concerning random points on a circle // *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen*. 1960. Series A 63. P. 38–47.
- Kossobokov V.G., Panza G.F.* A Myth of Preferred Days of Strong Earthquakes? // *Seismological Research Letters*. 2019. (In Press)
- Riguzzi F., Panza G., Varga P., Dogliani C.* Can Earth's rotation and tidal despinning drive plate tectonics? // *Tectonophysics*. 2010. V. 484. P. 60–73. DOI: 10.1016/j.tecto.2009.06.012
- Stephens M.A.* The goodness-of-fit statistic V_N : distribution and significance points // *Biometrika*. 1965. V. 52 (3–4). P. 309–321.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ «ТЕКТОНИКА-СЕЙСМИЧНОСТЬ» ХАИЛИНСКОГО ВЫСОКОМАГНИТУДНОГО ЦЕНТРА КОРЯКСКОГО ПОЯСА (СВ АЗИИ)

Яроцкий Г.П.

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский, Россия
E-mail: ecology@kscnet.ru*

Южная окраина СВ Азии от Корякского перешейка по мыс Дежнёва в геологии активных окраин континента маркируется Корякско-Дежнёвским позднекайнозойским вулканизмом, сопряжённым с сейсмичностью с $M \geq 2.5$. Сейсмичность трассирует северную окраину малой литосферной плиты Берингия. Наиболее активна полоса прибрежных хребтов юго-запада Корякского нагорья. Здесь, в бассейне р. Вывенки, Хаилинским (08.03.1991, $M = 6.6$) и Олюторским (20.04.2006, $M = 7.6$) землетрясениями образован высокомагнитудный Центр с полями афтершоков с $M = 5.0-6.6$.

Юг континента СВ Азии в тектонике окраин представлен глыбово-клавишной структурой литосферы [Яроцкий, 2017], вулканизм пояс маркирует границу юга Центрально-Корякской тектонической зоны позднего мела с Олюторской зоной палеоген-квартера. По простиранию пояс тектонически маркируется отдельными площадями СВ простирания – вулканогенами. Вулканогены выражены поднятиями на п-овах побережья: Ильпырский-Ильпинский-Говена-Олюторский-Юго-Восточных мысов и т.д. до окончания материка. На СВ они по простиранию пояса разграничены складчатыми глубинными структурами прогибов заливов: Олюторский, Юго-Восточно-Корякских бухт и др. Разделение полуостровов от заливов произошло по системе поперечных межглыбовых СЗ разломов литосферы – они СЗ элементы планетарной диагональной сети трещиноватости.

Центр лежит в глыбе литосферы Олюторского залива с Ильпинско-Тылговаямским региональным прогибом. Прогиб заложен на окраине континента в эоцене и развивался по плиоцен. Особенностью его разреза является максимум погружения всех его горизонтов в средней части глыбы – в местах гипоцентров Хаилинского и Олюторского землетрясений близ с. Хаилино. Максимумы фиксируют кили всех горизонтов прогиба – через них проходит глубинный продольный СЗ срединно-осевой Хаилинский разлом погруженной Олюторской глыбы. Через зону разлома со стороны океана в позднемеловое время на сушу напозла океаническая кора (ватынская и ачайваямская свиты) с пластинами тел габроидов. На поверхности глыбы породы образовали систему надвигов – уникальное по их плотности место во всей позднемеловой окраине континента. Надвиги продолжались уже и на побережье в палеогеновое время. Кили отражают максимум мощности пород океанских террейнов. Образование глубинной прогнутой части литосферы Олюторского залива – уникальный объект в геологии и сейсмичности в Корякском сейсмическом поясе. Он обязан процессам в низах литосферы [Карта рельефа подошвы..., 1996]. Глыба лежит на ЮВ продолжении региональной высокоградиентной зоны резкого изменения глубины залегания подошвы литосферы – литосферного трога глубиной до 70 – 78 км, на линии Янский залив,

моря Лаптевых – село Хаилино. На юге трога (81 км) лежит максимум Ильпинско-Тылговаямского СЗ прогиба с мощностью осадков в нём до 44 км, а ещё далее к ЮВ север Командорской котловины. Именно трог был в позднем мелу – салазками движения морских террейнов на Корякский микроконтинент.

На оси глыбы Олюторского залива литосферы в зоне её продольно-осевого СЗ Хаилинского разлома образовалась линейная сейсмогено напряжённая колонна. Она пересекается разломом русла р. Вывенки – продольной осью СВ локальной Вывенской впадины – максимум Ильпинско-Тылговаямского прогиба. В схеме разломных дислокаций Олюторского поля афтершоков продольная ось Вывенской впадины маркируется магистральными сейсмораздувами и множеством сейсмодислокаций. Пересечение Хаилинского разлома и Вывенской оси образовало критически напряжённую вертикальную колонну с гипоцентрами: Хаилинским – 35 км, Олюторским – 1 км. Оба создали высокомагнитудный рой за 15 лет напряжений в одной колонне с совпадающими эпицентрами. Хаилинский продольно-осевой разлом глыбы прослежен к СЗ на 200 км, а с учётом событий в Командорской котловине и до 450 км. На подобном разломе поднятой глыбы Олюторского п-ова лежит Корякское землетрясение (13.10.1981, $M = 5.9$).

Системный анализ элементов геолого-геофизической системы «тектоника-сейсмичность» Хаилинского высокомагнитудного центра показал истоки его уникальности в Корякском сейсмическом поясе. Глыбово-клавишная структура литосферы активной окраины материка СВ Азии является эффективным инструментом познания законов формирования системы «тектоника-сейсмичность» окраин континента.

Литература

- Карта рельефа подошвы литосферы России. Масштаб 1: 10 000 000. Объяснительная записка / Ред. В.В.Соловьёв, В.М. Рыжкова. М., СПб.: Роскомнедра, ВСЕГЕИ, 1996. С. 187–194.
- Яроцкий Г.П.* Глыбово-клавишная структура литосферы активной окраины континента на СВ Азии. Корякско-Камчатский регион // Геология и геофизика Юга России. 2017. № 2. С. 135–151.

IDENTIFYING POTENTIAL EARTHQUAKE SOURCES IN THE CONTINENTAL ENVIRONMENTS

Gorshkov A.¹, Novikova O.¹, Gaudemer Y.², Mandal P.³, Hassan H.⁴

¹ *Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow, Russia*

² *Institute de Physique du Globe de Paris, Paris, France*

³ *CSIR-National Geophysical Research Institute, Hyderabad, India*

⁴ *National Research Institute of Astronomy and Geophysics, Cairo, Egypt*
E-mail: gorshkov@mitp.ru

(oral)

Some of the intra-continental areas exhibit the seismic activity characterized by earthquakes of the low-to-moderate size with rare occurrence of strong events. Seismic hazard assessment of such regions is impeded because their seismic history is normally very pure. In this work, we suggest a phenomenological approach based on pattern recognition for identifying seismogenic structures in the intraplate regions. We study the French Massif Central located within the West-European platform, the Gujarat area situated at the edge of the Indian shield, and north-east Egypt located in the northeastern corner of the African continent. The methodology is based on the idea that earthquakes nucleate at nodes, specific structures forming around fault intersections [Gelfand, 1972]. Morphostructural zoning method (MZ) [Gorshkov, 2003] was used to identify nodes in all these regions. MZ delineates a hierarchical system of blocks with their boundaries, morphostructural lineaments. The intersections of lineaments are viewed as nodes. The pattern recognition technique was employed to identify the seismogenic nodes on the base of geomorphic, geological, and gravity parameters describing nodes. As a result, seismogenic nodes capable of earthquakes with $I \geq VI$ have been defined in the French Massif Central [Gorshkov, 2019a], while in the Gujarat area and in north-east Egypt [Gorshkov, 2019b] we have recognized nodes prone to M5+ earthquakes. We also found the characteristic geological-geophysical features that discriminate seismogenic nodes from non-seismogenic ones. The work provides methodology for identifying the possible locations of earthquake sources in the continental environments.

References

- Gelfand I., Guberman Sh., Izvekova M., Keilis-Borok V., Rantsman E. Criteria of high seismicity, determined by pattern recognition // *Tectonophysics*. 1972. V. 13. P. 415–422.
- Gorshkov A., Kossobokov V., Soloviev A. Recognition of earthquake-prone areas // *Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction* / Eds. Keilis-Borok V., Soloviev A. Heidelberg: Springer, 2003. P. 239–310.
- Gorshkov A., Gaudemer Y. Seismogenic nodes defined with pattern recognition in the French Massif Central // *Journal of Iberian Geology*. 2019a. V. 45 (1). P. 63–72. DOI: 10.1007/s41513-018-0087-x
- Gorshkov A., Hassan H., Novikova O. Seismogenic nodes ($M \geq 5.0$) in north-east of Egypt and implication for seismic hazard assessment // *Pure Appl. Geophys.* 2019b. V. 176 (2). P. 593–610. DOI: 10.1007/s00024-018-2012-9

30+ YEARS OF MATHEMATICAL AND SCIENTIFIC EXCELLENCY IN EARTHQUAKE PREDICTION AND SEISMIC RISK ASSESSMENTS

Ismail-Zadeh A.T.

*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics,
Russian Academy of Sciences (IEPT RAS), Moscow, Russia
Karlsruhe Institute of Technology, Institute of Applied Geosciences,
Karlsruhe, Germany
E-mail: aismail@mitp.ru, alik.ismail-zadeh@kit.edu*

(oral)

The Institute's founder Vladimir Keilis-Borok wrote in 1964 a paper "Seismology and logic", where he put forwards his ideas on how mathematics and emerging computational science can promote geophysical sciences and, specifically, seismology. This was the beginning of two scientific bodies to become known worldwide in the community of mathematical geophysics: the Commission on Mathematical Geophysics (CMG) of the International Union of Geodesy and Geophysics, and the Department of Computational Geophysics (DCG) at the O. Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. The founder and the first head of both bodies (CMG and DCG) was Keilis-Borok. The establishment in 1989 of the (International) Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics (referred to as MITPAN until now by foreign colleagues, who collaborated with the Institute) in the system of the Russian Academy of Sciences is also associated with the name of Keilis-Borok. A triggering event for the Institute's founding was the 1988 Spitak disaster associated with a strong earthquake, when the Soviet government decided to set up a scientific institution to work on earthquake prediction.

During this talk I shall highlight the major achievements of the Institute for the last thirty years in development of theories for earthquake prediction and disaster risk assessments. Starting with the fundamentals in earthquake prediction related to nonlinear dynamics of the lithosphere as a complex hierarchical system, tectonic stress localizations and their release in earthquakes, complexity and critical phenomena, I shall move to understanding of earthquake prediction as a tool for disaster risk reduction highlighting important earthquake algorithms developed by MITPAN experts such as CN, M8, SSE, ROC and some others, as well as the Molchan Error Diagram to assess earthquake predictions as well as to provide a scientific answer whether earthquake can be predicted. I shall speak also about the development of methods for recognition of earthquake-prone areas and models of seismicity such as inverse cascade and block-and-fault dynamics models. Finally, I shall highlight the pioneering work in seismic risk assessment methodologies developed in the Institute as well as seismic hazard and risk assessment strategies.

SEISMIC HAZARD ANALYSIS – IN 50 YEARS PERSPECTIVE

Kijko A., Smit A.

University of Pretoria Natural Hazard Centre, Pretoria, South Africa

E-mail: andrzej.kijko@up.ac.za

(oral)

Estimating the ground motion that could occur at a particular site is crucial in the design of both vital structures, such as nuclear power plants, bridges, and dams, and ordinary structures, such as houses and commercial buildings. The process of assessing future earthquake ground motion parameters is called seismic hazard assessment or seismic hazard analysis. Seismic hazard analysis is not new, it was introduced more than 50 years ago by Cornell in his landmark study in 1968 [Cornell, 1968].

The traditional approach in seismic hazard analysis has been deterministic. Deterministic seismic hazard analysis (DSHA) involves an assessment of a single maximum possible magnitude earthquake m_{\max} and its location with respect to the investigated site [SSHAC..., 1997]. Assuming that each of these earthquakes will occur at the minimum possible distance from the site, the ground motion is calculated using approximate attenuation equations, known as the ground motion model (GMM). The DSHA can be justified e.g. for a specified fault segment, a fault that is known to break repeatedly, generating similar size earthquakes [National Research Council..., 1988].

However, this straightforward and intuitive procedure of seismic hazard analysis is overshadowed by the complexity and uncertainty in selecting the appropriate earthquake scenario. This creates the need for an alternative, *probabilistic* methodology free from selecting an earthquake occurrence scenario. Probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) quantifies the rate (or probability) of exceeding various ground motion levels at a site (or sites), from all earthquakes of all possible magnitudes, and at all significant distances from the site of interest [McGuire, 2004].

The presentation is dedicated to virtually all aspects of PSHA. It includes discussion of the concept of seismic hazard, the techniques of seismic hazard assessment, the required input data and information, the estimation of seismic hazard parameters, the meaning of final product of hazard analysis – the hazard curve and its interpretation. Since the currently applied procedures of PSHA are not without controversy, the disputable aspects of hazard analysis will be also discussed.

References

- Cornell C.A. Engineering seismic risk analysis // Bull. Seism. Soc. Am. 1968. V. 58. P. 1583–1606.
- McGuire R.K. Seismic Hazard and Risk Analysis. Oakland: Earthquake Engineering Research Institute, 2004. 240 p.
- National Research Council. Probabilistic Seismic Hazard Analysis. Washington, DC: The National Academies Press, 1988. 111 p. DOI: 10.17226/19108
- SSHAC: Senior Seismic Hazard Committee. Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and use of Experts (NUREG/CR-6372, UCR-ID-122160). Main Report 1. Prepared for Lawrence Livermore National Laboratory. United States, 1997.

THE PRE- AND POST- DEFORMATIONS OF THE GREAT EARTHQUAKES FROM GPS AND SEISMIC DATA

Liu T.¹, Kossobokov V.G.^{2,3}

¹ *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing, China*

² *Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow, Russian Federation*

³ *Institut de Physique du Globe de Paris, Paris, France*
E-mail: liutai_718@126.com

(poster)

Earthquakes cannot be predicted with ultimate precision in time and space due to the complexity of earthquake recurrence process. Based on the analysis of global seismic data in advance the great, $M \geq 8$ earthquakes, V.I. Keilis-Borok and V.G. Kossobokov [Keilis-Borok, 1990] created an intermediate-term middle-range earthquake prediction algorithm, named M8, which diagnose loss of stability in the hierarchical system of blocks-and-faults of the Earth's lithosphere. The M8 algorithm passed a rigid global test in the real-time prediction experiment [Kossobokov, 1999; 2017a]. The M8 predictions could have been utilized to implement measures and improve earthquake preparedness in advance [Davis, 2012]; unfortunately this was not done, in part due to the predictions' limited distribution and the lack of applying existing methods for using intermediate-term predictions to make decisions for taking action.

Compared to earthquake forecasting, studies of earthquake hazard and risk assessment may appear more practical in a specific area, if reliable but not necessarily perfect [Kossobokov, 2015]. With the accumulation of seismic and other geophysical data and update of methodologies, the accuracy and reliability of seismic risk assessment can be improved. In particular, the introduction of GPS observation data leads to better understanding of earthquake origins. The process of earthquake rupture can be modeled based on durable surface co-seismic observations [Hamling, 2017; Ozawa, 2011]. V.G. Kossobokov and A.K. Nekrasova [Kossobokov, 2017b; 2019] analyzed the aftershock sequences of the recent strong and major earthquakes in Central Italy and New Zealand based on Unified Scaling Law for Earthquakes (USLE). The results of a joint seismic and GPS data analysis can supply decision-makers with information for improving local operational seismic hazard assessments. For this, we cross-compare the pre- and post-seismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki Mw9.0 earthquake in Japan and 2016 Kaikoura Mw7.8 earthquake in New Zealand derived from GPS observations with integral characteristics of the regional seismic regime, including the USLE control parameter that determines earthquake recurrence derived from earthquake catalogues.

References

Davis C., Keilis-Borok V., Kossobokov V., Soloviev A. Advance Prediction of the March 11, 2011 Great East Japan Earthquake: A Missed Opportunity for Disaster Preparedness // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2012. V. 1. P. 17–32. DOI: 10.1016/j.ijdr.2012.03.001

- Hamling I.J., Hreinsdóttir S., Clark K., et al.* Complex multifault rupture during the 2016 Mw 7.8 Kaikōura earthquake, New Zealand // *Science*. 2017. V. 356 (6334). Article eaam7194. DOI: 10.1126/science.aam7194
- Keilis-Borok V.I., Kossobokov V.G.* Premonitory activation of seismic flow: algorithm M8 // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1990. V. 61 (1–2). P. 73–83. DOI: 10.1016/0031-9201(90)90096-g
- Kossobokov V.G.* Testing an Earthquake Prediction Algorithm: The 2016 New Zealand and Chile Earthquakes // *Pure Appl. Geophys.* 2017a. V. 174 (5). P. 1845–1854. DOI: 10.1007/s00024-017-1543-9
- Kossobokov V.G., Nekrasova A.K.* Characterizing aftershock sequences of the recent strong earthquakes in Central Italy // *Pure and Applied Geophysics*. 2017b. V. 174 (10). P. 3713–3723. DOI: 10.1007/s00024-017-1624-9
- Kossobokov V.G., Nekrasova A.K.* Aftershock Sequences of the Recent Major Earthquakes in New Zealand // *Pure and Applied Geophysics*. 2019. V. 176 (1). P. 1–23. DOI: 10.1007/s00024-018-2071-y
- Kossobokov V., Peresan A., Panza G.F.* Reality Check: Seismic Hazard Models You Can Trust // *EOS Transactions*. 2015. V. 96 (13). P. 9–11. DOI: 10.1029/2015EO031919
- Kossobokov V.G., Romashkova L.L., Keilis-Borok V.I., Healy J.H.* Testing earthquake prediction algorithms: Statistically significant real-time prediction of the largest earthquakes in the Circum-Pacific, 1992-1997 // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1999. V. 111 (3-4). P. 187–196. DOI: 10.1016/S0031-9201(98)00159-9
- Ozawa S., Nishimura T., Suito H., Kobayashi T., Tobita M., Imakiire T.* Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake // *Nature*. 2011. V. 475 (7356). P. 373–376. DOI: 10.1038/nature10227

EARTH TREMOR COHERENCE FIELD

Lyubushin A.A.

Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia

E-mail: lyubushin@yandex.ru

(oral)

A new method for investigating the coherence field of the noise component of high-frequency GPS time series is proposed. The method is applied to the main territory of the United States, which is characterized by a dense network of near 6000 GPS stations. The data are presented in steps of 5 minutes from February 28, 2013 until June 29, 2019 on the Nevada Geodetic Laboratory website. The proposed method estimates the spatial distribution of the mean values of multiple coherence, calculated within nodes of a regular grid, between GPS coordinates of a given number of nearest operable stations and the periods at which the maximum values of coherence are reached. The two-dimensional probability density of the positions of places where the coherence maximum is most often realized is estimated. These estimates can be obtained for the entire history of observations and also in a sliding time window of a given length, which makes it possible to trace the dynamics of changes in time in the coherence field of the earth's tremor. The entropy of the two-dimensional probability density of places of concentration of maximum values of coherence allows us to distinguish seasonal changes in the structure of the coherence field of GPS noise. To study the temporal dynamics, we use the auxiliary time series of changes in the maximum multiple coherence at 50 reference points located throughout the study area. The study of the coherence properties of this auxiliary 50-dimensional time series (“secondary coherence”) in a 180-day sliding time window highlighted a series of synchronization bursts of earth's surface tremors. The research presents continuation of the recent investigations of background processes in the Earth's crust, based on estimating coherence measures of geophysical fields random fluctuations [Lyubushin, 2018a, 2018b].

The work is supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 18-05-00133.

References

- Lyubushin A. Synchronization of Geophysical Fields Fluctuations // Complexity of Seismic Time Series: Measurement and Applications / Eds. T. Chelidze, L. Telesca, F. Vallianatos. Elsevier, 2018a. P. 161–197. DOI: 10.1016/B978-0-12-813138-1.00006-7*
- Lyubushin A. Global coherence of GPS-measured high-frequency surface tremor motions // GPS Solutions. 2018b. V. 22. Article 116. DOI: 10.1007/s10291-018-0781-3*

NDSHA: A NEW PARADIGM FOR RELIABLE SEISMIC HAZARD ASSESSMENT.
PART 1 – TIME INDEPENDENT

Panza G.F.^{1,2,3,4}

¹ *Accademia Nazionale dei Lincei, Roma, Italy*

² *Earthquake Administration, Beijing, China*

³ *International Seismic Safety Organization (ISSO), Arsita, Italy*

⁴ *Beijing University of Civil Engineering and Architecture (BUCEA)*

E-mail: giuliano@panza@fastwebnet.it

(oral)

A new paradigm is needed for Reliable Seismic Hazard Assessment RSHA, not only from consideration of (a) the huge human losses experienced in the many recently destructive earthquakes worldwide; but also from (b) theoretical considerations of seismic wave generation and propagation phenomena through often non-homogeneous media within the earth's crust, particularly when large and more complex fault ruptures occur. The Neo-Deterministic Seismic Hazard Assessment (NDSHA) method, proposed some twenty years ago, is found to reliably and realistically simulate the wide suite of earthquake ground motions that may impact civil populations as well as their heritage buildings. NDSHA effectively accounts for the tensor nature of earthquake ground motions formally described as the tensor product of the earthquake source functions and the Green's functions of the transmitting (pathway) medium. NDSHA uses all available information about the spacial distribution of large magnitude earthquake phenomena, including: (a) Maximum Credible Earthquake (MCE) – which is based on seismic history and seismotectonics; and (b) geological and geophysical data. Thus it does not rely on scalar empirical ground motion attenuation models (GMPEs), as these are often both: (a) weakly constrained by available observations; and (b) fundamentally unable to account for the tensor nature of earthquake ground motions.

NDSHA provides both robust and safely conservative hazard estimates for engineering design and mitigation decision strategies; but without invoking the chimeric (illusory) and physically rootless Hazard Curve: "annual frequency of earthquakes" / "earthquake return period". If specific applications may benefit from temporal information, including a gross estimate of the average earthquake occurrence rate, the definition of the Gutenberg-Richter frequency-magnitude relation (GR law) is performed according to the multi-scale seismicity model, and a rate can be assigned to each NDSHA modeled source. Observations from recent destructive earthquakes in Italy have all confirmed the validity of NDSHA's approach and application: (1) NDSHA has been applied to schools (<http://www.xeris.it/CaseStudies/index.html>); and (2) to tangible cultural heritage (<http://www.veneto.beniculturali.it/prevenzione-sismica-area-veneta>). Therefore we can very strongly encourage its widespread application in all earthquake-prone regions – to enhance both earthquake safety of civil populations and also resilience of community economies and infrastructure.

References

- De Natale G., Petrazzuoli S., Romanelli F., Troise C., Vaccari F., Somma R., Peresan A., Panza G.F.* Seismic risk mitigation at Ischia island (Naples, Southern Italy): An innovative approach to mitigate catastrophic scenarios // *Engineering Geology*. 2019. V. 261. Article 105285. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105285
- Fasan M., Magrin M., Amadio C., Romanelli F., Vaccari F., Panza G.F.* A seismological and engineering perspective on the 2016 Central Italy earthquakes // *Int. J. Earthquake and Impact Engineering*. 2016. V. 1. P. 395–420. DOI: 10.1504/IJEIE.2016.083253
- Gholami V., Hamzehloo H., La Mura C., Ghayamghamian M.R., Panza G.F.* Simulation of selected strong motion records of the 2003 Mw = 6.6 Bam earthquake (SE Iran), the modal summation-ray tracing methods in the WKBJ approximation // *Geophysical Journal International*. 2014. V. 196 (2). P. 924–938. DOI: 10.1093/gji/ggt405
- Rugarli P., Amadio C., Peresan A., Fasan M., Vaccari F., Magrin A., Romanelli F., Panza G.F.* Neo-Deterministic Scenario-Earthquake Accelerograms and Spectra: a NDSHA approach to seismic analysis // *Engineering Dynamics and Vibrations: Recent Developments* / Eds. J. Jia, and J.K. Paik. Florida, USA: CRC Press Boca Raton, 2019. P. 187–241. DOI: 10.1201/9781315119908-6
- Rugarli P., Vaccari F., Panza G.F.* Seismogenic nodes as a viable alternative to seismogenic zones and observed seismicity for the definition of seismic hazard at regional scale // *Vietnam Journal of Earth Sciences*. 2019. V. 41. P. 289–304. DOI:10.15625/0866-7187/41/4/14233

NDSHA: A NEW PARADIGM FOR RELIABLE SEISMIC HAZARD ASSESSMENT.
PART 2 – TIME (IN)DEPENDENT

Panza G.F.^{1,2,3,4}

¹ *Accademia Nazionale dei Lincei, Roma, Italy*

² *Earthquake Administration, Beijing, China*

³ *International Seismic Safety Organization, Arsita, Italy*

⁴ *Beijing University of Civil Engineering and Architecture*

E-mail: giuliano@panza@fastwebnet.it

(oral)

Although damaging earthquakes cannot yet be predicted with precision, intermediate-term (i.e. several months) and middle-range (i.e. few hundred kilometers scale) predictions of main shocks above a pre-assigned threshold (based on seismicity "alarms" generated by interpretive algorithms like CN and M8) may be properly used for the implementation of low-key preventive safety actions, as recommended by UNESCO in 1997. The proper integration of both seismological and geodetic information together has now been shown to reliably contribute to a reduction of the geographic extent of CN and M8 alarms (e.g. the 2016 - 2017 Seismic Crisis in Central Italy and the 2012 Emilia sequence) — and this defines a new paradigm for time-dependent hazard scenarios. In this supporting framework, GPS data are used to reconstruct the station velocities and strain patterns along pre-selected transects, which are properly oriented according to information about the known tectonic setting. Overall experience has shown promisingly that *analysis* of the available geodetic data (highlighting both velocity variations and related strain accumulations within the areas alarmed by CN and M8) can permit significant reductions of their sizes and extents. Following the currently accepted Eurocode 0 paradigm (CEN EN-1990:2002), when a tunable safety factor γ_{EM} , acting on the seismic moment representing the fault, is introduced, in most of the territory considered, the NDSHA hazard map computed using seismogenic nodes with the safety factor γ_{EM} , envelopes or is comparable to the NDSHA hazard map obtained using the 1000+ years catalogue. As the two sets are totally independent and the Italian catalogue is very long, both a validation of the seismogenic nodes method and a tuning of the safety factor γ_{EM} at about 2 is supplied.

References

CEN EN 1990:2002 Eurocode - Basis of structural design, April 2002.

Crespi M., Kossobokov V., Panza G.F., Peresan A. Space-Time Precursory Features within Ground Velocities and Seismicity in North-Central Italy // PAGEOPH. 2019. DOI: 10.1007/s00024-019-02297-y

De Natale G., Petrazzuoli S., Romanelli F., Troise C., Vaccari F., Somma R., Peresan A., Panza G.F. Seismic risk mitigation at Ischia island (Naples, Southern Italy): An innovative approach to mitigate catastrophic scenarios // Engineering Geology. 2019. V. 261. Article 105285. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105285

Fasan M., Magrin M., Amadio C., Romanelli F., Vaccari F., Panza G.F. A seismological and engineering perspective on the 2016 Central Italy earthquakes // Int. J. Earthquake and Impact Engineering. 2016. V. 1. P. 395–420. DOI: 10.1504/IJEIE.2016.083253

- Gholami V., Hamzehloo H., La Mura C., Ghayamghamian M.R., Panza G.F.* Simulation of selected strong motion records of the 2003 Mw = 6.6 Bam earthquake (SE Iran), the modal summation-ray tracing methods in the WKBJ approximation // *Geophysical Journal International*. 2014. V. 196 (2). P. 924–938. DOI: 10.1093/gji/ggt405
- Panza G.F., Peresan A., Sanso` F., Crespi M., Mazzoni A., Nascetti A.* How geodesy can contribute to the understanding and prediction of earthquakes // *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*. 2018. V. 29 (Suppl. 1). P. 81–93. DOI: 10.1007/s12210-017-0626-y
- Rugarli P., Amadio C., Peresan A., Fasan M., Vaccari F., Magrin A., Romanelli F., Panza G.F.* Neo-Deterministic Scenario-Earthquake Accelerograms and Spectra: a NDSHA approach to seismic analysis // *Engineering Dynamics and Vibrations: Recent Developments* / Eds. J. Jia, and J.K. Paik. Florida, USA: CRC Press Boca Raton, 2019. P. 187–241. DOI: 10.1201/9781315119908-6
- Rugarli P., Vaccari F., Panza G.F.* Seismogenic nodes as a viable alternative to seismogenic zones and observed seismicity for the definition of seismic hazard at regional scale // *Vietnam Journal of Earth Sciences*. 2019. V. 41. P. 289–304. DOI:10.15625/0866-7187/41/4/14233

FORECASTING EARTHQUAKES AND RELATED GROUND SHAKING: TESTING AND VALIDATION ISSUES

Peresan A.¹, Kossobokov V.², Nekrasova A.², Panza G.F.^{3,4,5,6}

¹ *Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale, Seismological
Research Centre, Udine, Italy*

² *Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,
Moscow, Russia*

³ *Accademia Nazionale dei Lincei, Roma, Italy*

⁴ *China Earthquake Administration, Beijing, China*

⁵ *International Seismic Safety Organization, Arsita, Italy*

⁶ *Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing, China
E-mail: aperesan@inogs.it*

(oral)

A reliable and comprehensive characterization of expected seismic ground shaking, eventually including the related time information, is essential in order to develop effective mitigation strategies and increase earthquake preparedness. Forecasting earthquakes and related ground shaking, however, is not an easy task and it implies a careful application of statistics to data sets of limited size and different accuracy. Observations and physical models suggest that several processes in the Earth's lithosphere are predictable, but after substantial averaging and up to a limit. Accordingly, a success in forecasting earthquakes requires a holistic approach, where earthquake forecasting/prediction is posed as a successive, step-by-step, narrowing the magnitude range, territory, and time of expectation, all within the limits imposed by physics and data uncertainties.

Seismic Hazard Assessment (SHA) as well as Operational Earthquake Forecasting (OEF) information must be reliable, tested, confirmed by evidence, but not necessarily probabilistic [Kossobokov, 2015]. Prudent cost-effective mitigation actions can be taken if the prediction certainty is known, but not necessarily high [Davis, 2012]. It is indisputable that only by careful record of failures and successes one can eventually evaluate reliability and effectiveness of forecasting, by applying assessment tools adequate to SHA and OEF (e.g., the Error Diagram and the Seismic Roulette null-hypothesis). Moreover, such a testing must be done in advance claiming hazardous areas and/or times. The set of errors, i.e. the rates of failure and of the alerted space-time volume, compared to those obtained in the same number of random guess trials permits evaluating the forecasting method effectiveness and determining the optimal choice of the parameters defined by specified cost-benefit functions. Cross-checking of probabilistic models with observations from past earthquakes and independent physics based models is also recognized as major verification procedure [Nekrasova, 2015]. Comparing seismic hazard maps developed over time, as a matter of fact, is important to understand local divergences that show how the models are developing to the most recent one. The temporal sequence of maps is important: we have to learn from previous errors.

The existing maps from the standard probabilistic seismic hazard analysis (PSHA), as well as those from the neo-deterministic analysis (NDSHA), are considered to exemplify possibilities of a comparative analysis versus the observed ground shaking. Neo-deterministic refers to a scenario-

based approach, which allows for consideration of a wide range of possible earthquake sources as the starting point for scenarios constructed via full waveforms modelling. Besides the standard NDSHA maps, that provide reliable estimates of maximum seismic ground motion from a wide set of possible scenario earthquakes (including the largest deterministically or historically defined credible earthquake), the flexibility of NDSHA allows for the generation of ground shaking maps at specified long-term occurrence rates [Magrin, 2017], as well as for the definition of routinely updated time-dependent prognostic seismic hazard maps [Peresan, 2018 and references therein] through formally defined earthquake forecasting (i.e., CN and M8S algorithms).

The issues related with prospective testing and validation of the standard and time-dependent NDSHA scenarios are discussed. Seismic hazard maps seek to predict ground shaking that may actually occur. Therefore, maps based on NDSHA are cross-compared with the past and newly available hazard maps for the territory of Italy, as well as against documented seismic activity observed in reality. The final Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) results and the most recent version of Seismic Hazard Harmonization in Europe (SHARE) project maps, along with the reference hazard maps for the Italian seismic code, all obtained by PSHA, are considered for this comparative analysis [Nekrasova, 2015]. A preliminary cross-checking between observations and model ground motion rates is performed as well [Magrin, 2017]. Such a comparison exploits the uniqueness of the Italian earthquake catalogue, a data set covering more than a millennium (a time interval about ten times longer than that available in most of the regions worldwide) with a satisfactory completeness level for $M > 5$, which warrants this kind of analysis.

References

- Davis C., Keilis-Borok V., Kossobokov V., Soloviev A.* Advance Prediction of the March 11, 2011 Great East Japan Earthquake: A Missed Opportunity for Disaster Preparedness // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2012. V. 1. P. 17–32. DOI: 10.1016/j.ijdr.2012.03.001
- Kossobokov V., Peresan A., Panza G.F.* On operational earthquake forecast and prediction problems // Seismological Research Letters. 2015. V. 86 (2). P. 287–290. DOI: 10.1785/0220140202
- Magrin A., Peresan A., Kronrod T., Vaccari F., Panza G.F.* Neo-deterministic seismic hazard assessment and earthquake occurrence rate // Engineering Geology. 2017. V. 229. P. 95–109.
- Nekrasova A., Peresan A., Kossobokov V.G., Panza G.F.* A new probabilistic shift away from seismic hazard reality in Italy? // Nonlinear Mathematical Physics and Natural Hazards / Eds. B. Aneva and M. Kouteva-Guentcheva. Cham: Springer International Publishing, 2015. V. 163. P. 83–103. DOI: 10.1007/978-3-319-14328-6_7
- Peresan A.* Recent developments in the detection of seismicity patterns for the Italian region // Pre-Earthquake Processes: A Multi-disciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies / Eds. D. Ouzounov, S. Pulinets, K. Hattori, P. Taylor. AGU, 2018. P. 149–172. DOI: 10.1002/9781119156949.ch9

EARTHQUAKE CLUSTERS IDENTIFICATION AND CHARACTERIZATION BY DIFFERENT METHODS

Peresan A.¹, Varini E.², Zhuang J.³

¹ *Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale, Seismological
Research Centre, Udine, Italy*

² *Institute for Applied Mathematics and Information Technologies, Milano, Italy*

³ *Institute of Statistical Mathematics, Tokyo, Japan*

E-mail: aperesan@inogs.it

(oral)

Earthquake clustering is an essential characteristic of seismicity, and the space-time patterns of identified seismic clusters may provide important information about the structural and dynamic features of an area. However, in spite of the overall agreement on the existence of multiple types of seismic clusters (e.g. aftershocks, swarms, etc.), there is no agreed formal definition, nor a unique method to identify them. The application of different methods, relying on different physical and/or statistical assumptions, may lead to diverse identification of earthquake clusters and their internal structure. Moreover, the techniques used to formally capture the complexity of cluster related structure, including quantitative metrics and graphical tools, may provide a different insight on the same process. Hence we examine different declustering techniques, in order to investigate classification similarities and differences that might highlight their strengths/limits, and we explore the possible contribution to clusters characterization provided by some existing and new tools. Various techniques are considered for this purpose, ranging from methods based on classical deterministic space-time windows to stochastic branching models and *ad hoc* manual identification of aftershocks. In particular, the following clusters identification approaches are applied:

the two widely used *windows methods* by Gardner-Knopoff (GK) and Uhrhammer (U);

the *nearest-neighbor (NN) method*, which is based on nearest-neighbor distances between events in space-time-energy domain;

the *stochastic declustering (SD) method*, which is based on the space-time ETAS (epidemic-type aftershock sequence) model, a branching point process defined by a hazard function conditional on the observation history.

Both the NN and SD methods are data-driven and can be satisfactorily applied to decompose the seismic catalogue into background seismicity and individual sequences of earthquakes. Unlike the GK and U windows methods, they provide the links between events forming each cluster (or even several possible realizations of it, in the case of SD method), and thus allow studying the internal structure of the identified sequences.

At a first stage, we investigate the differences in clusters identification between windows (GK, U) and NN methods. For this purpose, a formal selection and comparative analysis of earthquake clusters is carried out for the most relevant earthquakes in North-Eastern Italy, as reported in the local OGS-CRS bulletins, compiled at the National Institute of Oceanography and Applied Geophysics since 1977 [Peresan, 2018]. The comparison is then expanded to selected earthquake sequences associated with recent strong earthquakes in Central Italy, occurring in a

different seismotectonic setting, by making use of INGV data. The results show that clusters identification by the NN method is pretty robust with respect to the time span of the input catalogue, as well as to minimum magnitude cut-off. The identified clusters for the largest events reported in North-Eastern Italy are well consistent with those reported in earlier studies, which were aimed at detailed manual aftershocks identification. The NN data-driven approach turns out well consistent with classical window approach for large events, while improving clusters identification in areas characterized by low to moderate seismic activity, where windowing methods necessitate adequate optimization. Moreover, the declustering performed by NN method preserves the features of inhomogeneous and possibly non-stationary background seismicity, relevant for several studies [Peresan, 2019].

With these results acquired, the main statistical features of seismic clusters in North-Eastern Italy are explored, focusing the comparative analysis on the characterization of the complex internal structure of clusters identified by the NN and SD methods. We analyse the sequences uniformly identified by the two approaches and we find that a comparable number of clusters is detected by both declustering methods: most of the events included in a SD-cluster are also included in the corresponding NN-cluster. Moreover, since both methods establish hierarchical relationships among events in a cluster, it is possible to represent each cluster as a tree graph in which the internal structure is displayed. Accordingly, we analyse in some detail the tree structure for a set of selected sequences [Varini, 2019]. For this purpose we borrow some measures of centrality from network analysis, with the aim of characterizing the internal structure of the clusters in the study region, and to identify possible common features that emerge from both declustering methods.

References

- Peresan A., Gentili S.* Seismic clusters analysis in Northeastern Italy by the nearest-neighbor approach // *Phys. of the Earth and Plan. Int.* 2018. V. 274. P. 87–104. DOI: 10.1016/j.pepi.2017.11.007
- Peresan A., Gentili S.* Identification and characterization of earthquake clusters: a comparative analysis for selected sequences in Italy and adjacent regions // *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata.* 2019. V. 60. DOI: 10.4430/bgta0249
- Varini E., Peresan A., Zhuang J.* Spatio-temporal earthquake clustering: insights and outlooks from Network Analysis // *Proceedings of the GRASPA Conference, 15-16 July 2019, Pescara, Italy. Book of Abstracts.* Bergamo, 2019. P. 51–52.

**SCIENTIFIC PRODUCTS OF EARTHQUAKE FORECAST
FOR SEISMIC DISASTER RESILIENCE: PRACTICE IN CHINA**

Wu Z.L. and the Coordination Group for Earthquake Forecast of CEA_IEF

*Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration,
Beijing, China*

E-mail: wuzhl@ucas.ac.cn

(oral)

Earthquake disasters have been one of the greatest threatens to the social and economic sustainability of China. In recent years, associated with the national actions of disaster prevention to transform from disaster reduction (DR) to disaster risk reduction (DRR), the role of earthquake forecast is facing to a historic paradigm shift. Nowadays the capability of forecasting earthquakes is still limited. One of the practical issues in serving the society is thus to make full use of the presently available capability of forecast to aid the prevention and mitigation of earthquake disaster to the largest extent. Especially, the combination of forecast with disaster scenarios, disaster insurance, now-casting, emergency preparedness, and earthquake early warning system (EEWS) provides the service for disaster resilience with brand new horizon. This presentation introduces and discusses several forecast practices carried out by the China Earthquake Administration (CEA), currently belonging to the newly established Ministry of Emergency Management, in the context of disaster prevention. Ordered by temporal scales, the practice includes the Identification of the Key Regions for Enhanced Monitoring and Preparedness (with decade scale) and the Degree of Emergence of such regions (with year scale), the Evaluation of Seismic Tendency (with three year scale), the Annual Consultation on the Likelihood of Earthquakes (with annual scale), the Map of Probabilities of Earthquakes (with month scale), the Targeted Monitoring of Seismic Tendency (with week scale), the Evaluation of Earthquake Sequence (with month scale after the earthquake), and the Evaluation of the Effects of Large Earthquakes on Seismic Tendency (with year scale after the earthquake). The new type of services to the society as well as their scientific basis and technological challenges are discussed. The discussion also highlights the difference and transition between basic research and service practice.

IDEAS AND SPIRITS OF FORENSIC SEISMOLOGY APPLIED TO EARTHQUAKE FORECASTING

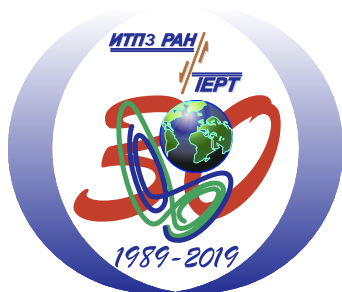
Wu Z.L.¹, and the Team of the Field Investigation of the 2013 Lushan Earthquake²

¹ *Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration,
Beijing, China*

² *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing, China
E-mail: wuzhl@ucas.ac.cn*

(oral)

The April 20, 2013, Lushan, Sichuan, China, $M_S7.0$ earthquake is one of the significant earthquakes in China in the 21st century. The seismo-tectonic picture of this earthquake is clear at the scales of lithosphere plate and crustal tectonic block, but remained puzzle at the scale of seismogenic faults. The relation between the Lushan earthquake and the 2008 Wenchuan Earthquake, that is, whether the Lushan earthquake could be regarded as an aftershock of the Wenchuan earthquake, was another issue in debate. Importantly, what would be the future seismic tendency (with annual temporal scale) in the ‘triple junction’ of the Longmenshan-Xianshuihe-Anninghe-Zemuhe Faults was the main concern of both the public and the governmental agencies. After the Lushan earthquake, field investigation was organized by the China Earthquake Administration (CEA), with clear target to answer the above mentioned three major questions, to some extent a paradigm shift of the organization of earthquake field investigation. To answer these questions, the ideas of forensic seismology, which was originally proposed from and applied to the practice of the monitoring of a Comprehensive nuclear Test Ban Treaty (CTBT), was applied to the investigation for earthquake forecast. In the comprehensive analysis of inter-disciplinary observation/monitoring data, ‘evidence chain’ was emphasized to draw the conclusion on the associate of seismogenic fault with earthquakes. Statistical seismological model was used to clarify the relation between the Wenchuan earthquake and the Lushan earthquake. Observations with different temporal scales were assembled for the estimate of the future seismic tendency of the target region. In the associate of observed anomalies, tectonics played an important role. The predictive estimate of the strong earthquakes was tested by the real situation in 2014. Although at present time, the capability of forecasting earthquakes is still limited, making full use of the currently available capability to draw some useful conclusions to aid the reduction of seismic disaster risk is needed, and operational to some extent. Without under-estimating the importance of systematic monitoring, analysis, and testing, the spirit of forensic seismology focuses on the use of information/evidence available to draw conclusions persuasive, reflecting the ‘do-the-best’ thought for seismic disaster risk reduction. Such spirits are especially important in the stage of the transition of earthquake forecast from empirical forecast to physical forecast.



«Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений»

27-28 ноября 2019 года
ИТПЗ РАН, Москва



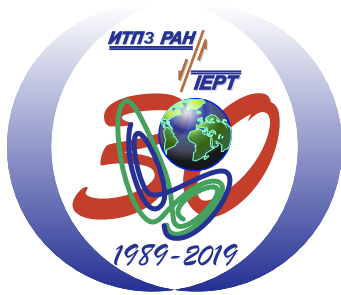
*Конференция проводится при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
проект № 19-05-20035*

ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ

27 ноября (среда)

9:00 10:00	Регистрация участников (холл у Конференц-зала ИКИ РАН)
10:00	Открытие (Конференц-зал ИКИ РАН)
Пленарные доклады (Конференц-зал ИКИ РАН)	
10:15	Гвишиани А.Д. (ИЦ РАН) Системный анализ геофизических данных: Big Data, Open Data and FAIR data
10:45	Wu Z. L. and the Coordination Group for Earthquake Forecast of CEA_IEF (Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing, China) Scientific products of earthquake forecast for seismic disaster resilience: practice in China
11:15	Narteau C. (Institut de Physique du Globe de Paris, Paris, France) Complex geophysical systems
11:45 12:00	<i>Кофе (Музей ИКИ РАН)</i>
12:00	Shapiro N. (Institut des Sciences de la Terre/Institute of Earth Sciences, Grenoble, France, IPE RAS) Seismology beyond earthquakes Совместно с ИКИ РАН
12:45	Panza G.F. (Accademia Nazionale dei Lincei, Roma, Italy) NDSHA: a new paradigm for reliable seismic hazard assessment. Part 1 – Time independent (no Скайпу)
13:15	Ismail-Zadeh A.T. (IEPT RAS, Karlsruhe Institute of Technology, Institute of Applied Geosciences, Karlsruhe, Germany) 30+years of mathematical and scientific excellency in earthquake prediction and seismic risk assessments
13:45 14:30	<i>Обед</i>





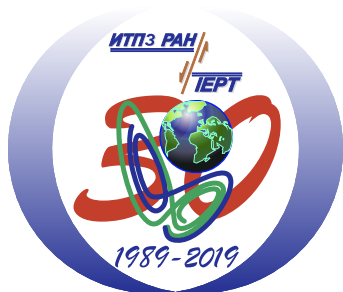
«Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений»

27-28 ноября 2019 года
ИТПЗ РАН, Москва



27 ноября (среда)

Сессия 1. Оценка сейсмической опасности, современные методы прогноза землетрясений (Конференц-зал ИКИ РАН)	
14:30	Panza G.F. (<i>Accademia Nazionale dei Lincei, Roma, Italy</i>) NDSHA: a new paradigm for reliable seismic hazard assessment. Part 2 – Time (in)dependent (no Скайпу)
15:00	Гитис В.Г., Дерендяев А.Б. (<i>ИППИ РАН</i>) Обобщение метода минимальной области тревоги для прогноза магнитуд землетрясений
15:20	Воробьева И.А., Шебалин П.Н., Соловьев А.А. (<i>ИТПЗ РАН</i>), Narteau C. (<i>Institut de Physique du Globe de Paris, Paris, France</i>) Картирование межплитового сцепления в зонах субдукции по вариациям магнитудно-частотного распределения сейсмичности
15:40	Gorshkov A.I., Novikova O.V. (<i>IEPT RAS</i>), Gaudemer Y. (<i>Institute de Physique du Globe de Paris, Paris, France</i>), Mandal P. (<i>CSIR-National Geophysical Research Institute, Hyderabad, India</i>), Hassan H. (<i>National Research Institute of Astronomy and Geophysics, Cairo, Egypt</i>) Identifying potential earthquake sources in the continental environments
16:00	Дзобоев Б.А., Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Белов И.О. (<i>ГЦ РАН</i>) Вариативный метод EPA и оценка сейсмической опасности
16:20	Lyubushin A.A. (<i>IPE RAS</i>) Earth tremor coherence field
16:40	Шебалин П.Н. (<i>ИТПЗ РАН</i>) Новые закономерности в сейсмическом режиме
Сессия 2. Развитие методов анализа сейсмических данных в целях изучения очага, среды, сейсмической опасности (Центр Отображения ИКИ РАН)	
14:40	Гравиров В.В. (<i>ИФЗ РАН, ИТПЗ РАН</i>), Лиходеев Д.В. (<i>ИФЗ РАН</i>), Кислов К.В. (<i>ИТПЗ РАН</i>) Отдельные вопросы разработки и применения прецизионных электронных термодатчиков сверхвысокой точности
15:00	Середкина А.И. (<i>ИЗК СО РАН, ИЗМИРАН</i>), Голубев В.А. (<i>ИЗК СО РАН</i>), Филиппов С.В. (<i>ИЗМИРАН</i>) Температурный режим литосферы Северного Прибайкалья по геомагнитным, геотермическим и сейсмологическим данным
15:20	Новиков Р.Г. (<i>ИТПЗ РАН, École Polytechnique, Centre de Mathématiques Appliquées, France</i>) Глобальная единственность в пассивной обратной задаче гелиосейсмологии
15:40	Подвигина О.М. (<i>ИТПЗ РАН</i>) Гетероклимические циклы в геофизике и гидродинамике
16:00	Желиговский В.А. (<i>ИТПЗ РАН</i>) Всё, что надо знать о геодинамо, за 15 минут
16:20	Фомочкина А.С. (<i>ИТПЗ РАН, РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина</i>), Букчин Б.Г. (<i>ИТПЗ РАН</i>) Проблемы определения параметров очагов землетрясений по записям поверхностных волн



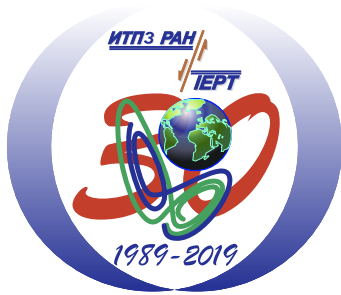
«Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений»

27-28 ноября 2019 года
ИТПЗ РАН, Москва



27 ноября (среда)

17:00 19:00	Стендовые доклады (Музей ИКИ РАН)
	Левшин А.Л. (<i>CU-Boulder, USA</i>) Немного истории
	Liu T. (<i>Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing, China</i>), Kossobokov V.G. (<i>IEPT RAS</i>) The pre- and post- deformations of the great earthquakes from GPS and seismic data
	Абубакарова Э.А. (<i>КНИИ РАН, ГГНТУ</i>) Геофизические поля, глубинное строение и сейсмичность Терско-Каспийского прогиба
	Жунусова А.Ж., Бектурганова Б.Б., Досайбекова С.К. (<i>ТОО «СОМЭ», Республика Казахстан</i>), Садыкова А.Б. (<i>Институт сейсмологии, Республика Казахстан</i>) Состояние сейсмичности Северного Тянь-Шаня Казахстана за 2015-2019 гг.
	Глухов А.Н., Седов Б.М. (<i>СВКНИИ ДВО РАН</i>) Активные разломы и оценка сейсмичности Кулу-Тенькинского района (Магаданская область) по результатам дистанционного зондирования
	Гравиров В.В. (<i>ИФЗ РАН, ИТПЗ РАН</i>), Кислов К.В. (<i>ИТПЗ РАН</i>) Способ фильтрации шумовой составляющей сейсмических сигналов, вызванных вариациями температуры снаружи и внутри сейсмических приборов
	Дергач П.А., Логинов Г.Н. (<i>ИНГГ СО РАН</i>) Алгоритм детектирования сигналов от слабых локальных землетрясений на основе сверточной нейронной сети: пример обработки реальных данных и сравнение с классическим методом
	Козырев А.А., Жукова С.А. (<i>ГИ КНЦ РАН</i>) Комплексная оценка влияния метеорологических и гидрогеологических факторов на сейсмическую активность Хибинского массива при ведении горных работ
	Козырев А.А., Журавлева О.Г. (<i>ГИ КНЦ РАН</i>) Комплексный подход к оценке сейсмической опасности при ведении горных работ
	Королева А.О. (<i>РГГУ им. С. Орджоникидзе, ИФЗ РАН</i>), Ивлева О.А. (<i>ИФЗ РАН</i>), Родкин М.В. (<i>ИТПЗ РАН</i>), Викулина М.А. (<i>Геогр. ф-т МГУ им. М.В. Ломоносова</i>) Свидетельства постледниковой сеймотектонической активности западных Хибин
	Ленькова Е.Н. (<i>Физический ф-т МГУ им. М.В. Ломоносова</i>) Сезонные компоненты наведённой сейсмичности в областях Чиркейского и Нурекского водохранилищ
	Ливинский А.И., Новикова О.В., Горшков А.И. (<i>ИТПЗ РАН</i>) Определение характерных геолого-геофизических признаков мест локализации крупных месторождений металлов в Алтае-Саянском регионе с помощью алгоритмов распознавания образов
	Улубиева Т.Р., Маматкулова З.С. (<i>Геофизическая служба Академии наук Республики Таджикистан</i>) Современная система сейсмического мониторинга Таджикистана
	Мурыськин А.С. (<i>ЛГНИУ, ГИ УрО РАН</i>), Шулаков Д.Ю. (<i>ГИ УрО РАН</i>), Скоркина А.А. (<i>ИТПЗ РАН</i>) Спектральный подход к оценке регистрационных возможностей систем сейсмомониторинга разной конфигурации на примере Урала и Кентернбери



**«Современные методы оценки
сейсмической опасности и
прогноза землетрясений»**

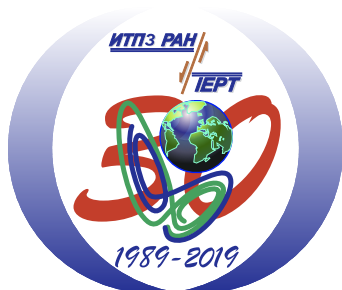
27-28 ноября 2019 года
ИТПЗ РАН, Москва



27 ноября (среда)

Продолжение.

17:00 19:00	Стендовые доклады (Музей ИКИ РАН)
	<p>Никитина М.А., Родкин М.В. (ИТПЗ РАН) Сейсмичность зоны субдукции западной части Аляски, связь с современной вулканической активностью и глубинным флюидным режимом</p>
	<p>Панас Н.М. (ФИЦ ЕГС РАН, с/с Пулково) Анализ волнового поля сейсмических сигналов, зарегистрированных станцией Лопухинка</p>
	<p>Середкина А.И. (ИЗК СО РАН, ИЗМИРАН) Глубинное строение верхней мантии Арктики по данным поверхностных волн</p>
	<p>Хажаяев Р.Р. (Физический ф-т МГУ им. М.В. Ломоносова) Спектральные характеристики высотного здания МГУ при метеорологических и сейсмических воздействиях</p>
	<p>Хачикян Г.Я. (ДТОО Институт ионосферы, Республика Казахстан) Метод оценки максимально возможной магнитуды землетрясения по параметрам главного геомагнитного поля</p>
	<p>Щепалина П.Д., Кособоков В.Г., Некрасова А.К. (ИТПЗ РАН) Лунно-солнечные приливы и сейсмичность Прибайкалья</p>



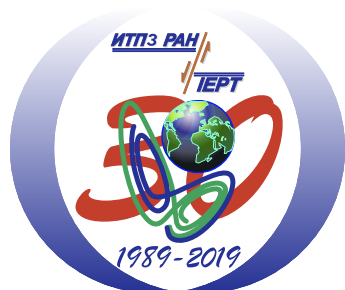
«Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений»

27-28 ноября 2019 года
ИТПЗ РАН, Москва



28 ноября (четверг)

Пленарные доклады (Конференц-зал ИКИ РАН)	
10:00	Wu Z.L. and the Team of the Field Investigation of the 2013 Lushan Earthquake (<i>Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing, China; and Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing, China</i>) Ideas and spirits of forensic seismology applied to earthquake forecasting
10:30	Kijko A., Smit A. (<i>University of Pretoria Natural Hazard Centre, Pretoria, South Africa</i>) Seismic hazard analysis – in 50 years perspective
11:15	Михайлов В.О. (<i>ИФЗ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова</i>), Киселева Е.А., Тимошкина Е.П., (<i>ИФЗ РАН</i>), Тимофеева В.А. (<i>ИФЗ РАН, ИТПЗ РАН</i>), Шапиро Н.М. (<i>Institut de Physique du Globe de Paris, Paris, France</i>), Смирнов В.Б. (<i>МГУ им. М.В. Ломоносова, ИФЗ РАН</i>), Хайретдинов С.А. (<i>ИФЗ РАН</i>) Изучение косейсмических и постсейсмических процессов по комплексу наземных и спутниковых данных
11:45 12:15	<i>Кофе (Музей ИКИ РАН)</i>
12:15	Peresan A. (<i>Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale, Seismological Research Centre, Udina, Italy</i>), Kossobokov V.G., Nekrasova A.K. (<i>IEPT RAS</i>), Panza G.F. (<i>Accademia Nazionale dei Lincei, Roma, Italy</i>) Forecasting earthquakes and related ground shaking: testing and validation issues
12:45	Григорян В.Г., Карапетян Дж.К. (<i>Институт геофизики и инженерной сейсмологии НАН Армении, г. Гюмри, Армения</i>) Карты сейсмической опасности территории Армении: этапы развития, новые нормативные карты ОСР РА
13:15	Соболев Г.А. (<i>ИФЗ РАН</i>) Проблемы краткосрочного прогноза землетрясений
13:45 14:40	<i>Обед</i>



«Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений»

27-28 ноября 2019 года
ИТПЗ РАН, Москва



28 ноября (четверг)

Сессия 1а. Оценка сейсмической опасности, современные методы прогноза землетрясений (Конференц-зал ИКИ РАН)	
14:40	Кислов К.В. (ИТПЗ РАН), Гравиров В.В. (ИТПЗ РАН, ИФЗ РАН) Раннее предупреждение о землетрясении: современное состояние и перспективы
15:00	Шебалин П.Н. (ИТПЗ РАН), Баранов С.В. (КоФ ФИЦ ЕГС РАН), Корчак П.А. (Кировский филиал АО «Апатит»), Жукова С.А. (Горный институт ФИЦ КНЦ РАН) Закон продуктивности в условиях техногенной сейсмичности
15:20	Григорян А.Г. , Лиходеев Д.В. (ИФЗ РАН) Изучение геодинамических процессов и выявление предвестников сильных ($M \geq 5$) землетрясений с помощью вариаций компонентов вектора переменного геомагнитного поля на примере Армении, Северного Кавказа и Италии
15:40	Баранов А.А. (ИТПЗ РАН, ИФЗ РАН), Шебалин П.Н. (ИТПЗ РАН), Баранов С.В. (Кольский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН») Оценка воздействия морских приливов на активность афтершоков в сейсмически активных районах
16:00	Гатинский Ю.Г. , Прохорова Т.В. (ИТПЗ РАН) Связь интенсивности сейсмичности Центральной Азии с современной геодинамикой региона
16:20	Воробьева И.А. , Горшков А.И. (ИТПЗ РАН), Mandal P. (CSIR-National Geophysical Research Institute, Hyderabad, India) Блоковая модель Гималайской дуги: Моделирование сейсмического цикла, дефицита проскальзывания и сильнейших землетрясений
16:40	Бурмин В.Ю. , Шемелева И.Б. (ИФЗ РАН), Аветисян А.М., Казарян К.С. (Институт геофизики и инженерной сейсмологии НАН Армении, г. Гюмри, Армения) Землетрясения Кавказа
Сессия 1б. Оценка сейсмической опасности, современные методы прогноза землетрясений (Центр Отображения ИКИ РАН)	
14:40	Peresan A. (Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale, Seismological Research Centre, Udina, Italy), Varini E. (Institute for Applied Mathematics and Information Technologies, Milano, Italy), Zhuang J. (Institute of Statistical Mathematics, Tokyo, Japan) Earthquake clusters identification and characterization by different methods
15:00	Герман В.И. (ГПКК «КНИИГиМС») Единая теория подобия структуры сейсмичности и ее применение для анализа каталогов землетрясений
15:20	Писаренко В.Ф. , Родкин М.В., Рукавишников Т.А. (ИТПЗ РАН) Стабильная модификация закона повторяемости землетрясений и перспективы её применения в сейсморайонировании
15:40	Завьялов А.Д. (ИФЗ РАН), Перетокин С.А. (ИФЗ РАН, СКТБ «Наука» ФИЦ КНЦ СО РАН) От сейсмической опасности к сейсмической безопасности: прогноз землетрясений, сейсмическое районирование и сейсмостойкое строительство
16:00	Родкин М.В. (ИТПЗ РАН) Обобщенная окрестность сильного землетрясения, приложение к физике сейсмического процесса и прогнозу землетрясений
16:20	Герман В.И. (ГПКК «КНИИГиМС») Прогноз обрушений на рудниках по данным сейсмического мониторинга на примере Жезказганского медного месторождения
16:40	Некрасова А.К. , Кособоков В.Г. (ИТПЗ РАН) Общий закон подобия для землетрясений: оценка сейсмической опасности и ассоциированных рисков
17:10 17:30	Заккрытие (Конференц-зал ИКИ РАН)

Научное издание

Всероссийская научная конференция с международным участием
Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений
ИТПЗ РАН, 27-28 ноября 2019 г., Москва

Тезисы докладов и программа конференции

Ответственный редактор:
к.ф.-м.н. Некрасова А.К.

Компьютерная верстка:
Прохорова Т.В., Бутова Л.А., Мациевская О.А.

Дизайн обложки:
д.ф.-м.н. Кособоков В.Г.

Оригинал-макет подготовлен в ИТПЗ РАН
117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

Москва-2019