

II Всероссийская научная конференция с международным участием

Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений



29-30 сентября 2021, ИТПЗ РАН, Москва

II All-Russian Scientific Conference with International Participation

Modern methods of seismic hazard assessment and earthquake prediction



29-30 September 2021, IEPT RAS, Moscow

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

*К 100-летию со дня рождения основателя ИТПГЗ РАН
академика РАН В.И. Кейлиса-Борока*

II Всероссийская научная конференция с международным участием

Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений

29-30 сентября 2021 г., Москва, Россия

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ И ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ

Под редакцией к.ф.-м.н. О.В. Селюцкой

Москва
2021

Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов II всероссийской конференции с международным участием. 29-30 сентября 2021 г. Москва: ИТПЗ РАН, 2021. – 125 с.

В сборнике публикуются тезисы докладов II Всероссийской конференции с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», которая состоялась 29-30 сентября 2021 г. в Институте теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва. Конференция была приурочена к 100-летию со дня рождения основателя уникальной научной школы и первого директора ИТПЗ РАН академика В.И. Кейлиса-Борока. На конференции были представлены основные достижения в области математической геофизики, сейсмологии, геодинамики. Рассматривались методы оценки сейсмической опасности, прогноза мест возможного возникновения сильнейших сейсмических событий, алгоритмы прогноза землетрясений и методы оценки надёжности и достоверности результатов прогноза, вопросы связи геодинамики с сейсмичностью, методы анализа баз данных – сейсмологических, геомагнитных, систем глобального позиционирования, в том числе больших объёмов данных (Big Data).

Ответственный редактор:

к.ф.-м.н. О.В. Селюцкая

Компьютерная верстка:

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

Дизайн обложки:

д.ф.-м.н. В.Г. Кособоков

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатель: чл.-корр. РАН П.Н. Шебалин

Заместитель председателя: к.ф.-м.н. О.В. Селюцкая

Члены комитета: к.ф.-м.н. А.К. Некрасова, к.т.н. А.С. Фомочкина, А.О. Антипова, Л.А. Бутова, В.Х. Каберов, А.И. Ливинский, О.А. Мациевская, Т.В. Прохорова, М.А. Семка, В.А. Тимофеева, А.В. Трубенков, П.Д. Щепалина.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель: чл.-корр. РАН А.А. Соловьев (ИТПЗ РАН)

Заместитель председателя: д.ф.-м.н. А.И. Горшков (ИТПЗ РАН)

Члены комитета: академик РАН В.В. Адушкин (ИДГ РАН), проф. Дж. Ву (Институт прогноза землетрясения Китайской Администрации по землетрясениям, КНР), д.ф.-м.н. В.А. Желиговский (ИТПЗ РАН), проф. И.В. Заляпин (Университет Невада, Отделение математики и статистики, США), д.ф.-м.н. А.Т. Исмаил-Заде (ИТПЗ РАН, Институт прикладных геонаук Технологического университета Карлсруэ, Германия), к.г.н. Д.К. Карапетян (Институт геофизики и инженерной сейсмологии им. А. Назарова НАН, Республика Армения), проф. А. Кийко (Университет Претории Центр исследования стихийных бедствий, ЮАР), д.ф.-м.н. В.Г. Кособоков (ИТПЗ РАН), проф. В. Куртильо (Институт физики Земли, Франция), д.ф.-м.н. Г.М. Молчан (ИТПЗ РАН), проф. К. Нарто (Институт физики Земли, Франция), академик Д.Ф. Панца (иностраный член РАН, Академия деи Линчеи, Италия), проф. А. Пересан (Национальный институт океанографии и экспериментальной геофизики, Италия), д.ф.-м.н. А.В. Пономарев (ИФЗ РАН), д.ф.-м.н. М.В. Родкин (ИТПЗ РАН), проф. В.Б. Смирнов (МГУ имени М.В. Ломоносова), чл.-корр. РАН Ан.Ал. Соловьев (ГЦ РАН), д.ф.-м.н. Г.М. Стеблов (ИФЗ РАН).

ОГЛАВЛЕНИЕ

Агаян А.С., Некрасова А.К. Применение алгоритма топологической фильтрации DPS для анализа сейсмичности: Прибайкалье	10
Адилов З.А., Асекова З.О. Иерархическая ранжированность и масштабная инвариантность сейсмического процесса территории Дагестана	14
Александров П.Н., Непеина К.С. Перспективы развития геофизического мониторинга для изучения современных геодинамических процессов	15
Андреев Е.В. Оценка оптимизации численного решения уравнения Эйлера полулагранжевым методом	17
Баранов С.В., Моторин А.Ю., Шебалин П.Н. Оценка магнитуды сильнейшего афтершока в Хибинском массиве	19
Батугин А.С. Участки предельно напряженного состояния земной коры как среда для техногенных землетрясений	22
Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова Е.В., Воронова О.С., Феоктистова Н.В. Исследования аномальных возмущений в системе литосфера-атмосфера-ионосфера в период подготовки землетрясения в Италии 24 августа 2016 г. по данным космического мониторинга	24
Ботвина Л.Р., Завьялов А.Д. О физическом смысле критериев, используемых в сейсмологии	27
Бурмин В.Ю. Критерий C-оптимальности планов в задачах оптимального расположения сейсмических станций	29
Воробьева И.А., Горшков А.И., Мандал П. Моделирование возможности сильнейших землетрясений в Индо-Бирманской дуге	31
Герман В.И. Учет группирования землетрясений во времени при оценке сейсмической опасности	32
Гитис В.Г., Дерендяев А.Б., Петров К.Н. О подходе к систематическому прогнозу землетрясений	34
Гладков А.А., Лунина О.В. Web-ориентированная ГИС «ActiveTectonics» как банк данных информации по активной тектонике юга Восточной Сибири	36
Горшков А.И., Новикова О.В., Димитрова С., Димова Л., Райкова Р. Сейсмоопасные (M6+) узлы Болгарского региона	38
Гравиров В.В., Лиходеев Д.В., Кислов К.В. Эльбрусская геофизическая система прецизионных температурных измерений: в погоне за 0.0001 градуса	40
Джурик В.И., Брыжак Е.В., Серебренников С.П. Сейсмокриодинамика Байкальского региона и оценка влияния мерзлотных условий на сейсмическую опасность при деградации мерзлоты	43
Желиговский В.А. Пространственная аналитичность и глобальные априорные оценки соболевских норм решений системы уравнений диффузионной магнитогидродинамики и их производных по времени	45

Завьялов А.Д. Алгоритм КОЗ – 35 лет тестирования и последние результаты	47
Зейналова Н.Р., Исмаил-Заде А.Т., Мельник О.Э., Цепелев И.А., Зобин В.М. Численное моделирование роста лавовых куполов на примере вулкана Колима в Мексике.....	49
Ильченко В.Л. Система разломов в зоне отлива вдоль береговой линии Турьего полуострова (Кандалакшский залив, Белое море) как признак современной сеймотектонической активности	50
Калинников И.И., Михеева А.В. Особенности поведения крипекс-параметра в глубинных сейсмофокальных зонах	52
Кафтан В.И. Коровая погода и сильные землетрясения. Дефицит современных движений и деформационные волны по ГНСС наблюдениям	54
Кислов К.В., Гравиров В.В. Чем DAS полезен для нас	56
Коган Л.П., Канониди К.Х., Вольвач А.Е., Надежка Л.И., Бубукин И.Т., Боборыкина О.В., Штенберг В.Б., Биазитов Д.Т. О возникновении серии детерминированных феноменов перед землетрясением магнитудой 5.4, произошедшего 25 июня 2021 года вблизи города Яйладере (Турция)	59
Костин В.М. Ионосферные эффекты подземных ядерных взрывов по данным спутника Космос-1809	61
Кочарян Г.Г. Исследования геомеханики разломов в интересах прогноза землетрясений	63
Крушельницкий К.В., Маточкина С.Д. Карта продуктивности землетрясений Камчатского региона	65
Ливинский А.И., Горшков А.И., Новикова О.В. Характерные геолого-геофизические признаки рудоносных узлов Кавказа и Алтай-Саянского региона.....	66
Лопатин М.Н., Семенов Р.М. Циклы при выявлении гидрогеохимического предвестника землетрясения.....	69
Любушин А.А. Сейсмический шум и сейсмическая опасность на Японских островах	71
Михайлов В.О., Тимофеева В.А., Смирнов В.Б., Тимошкина Е.П., Шапиро Н.М. Моделирование поверхности разрыва Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 с использованием данных РСА-интерферометрии.....	72
Морозов А.Н., Ваганова Н.В. Уточнение параметров гипоцентров землетрясений, зарегистрированных в раннеинструментальный период.....	74
Новикова О.В., Горшков А.И. Распознавание потенциальных цунамигенных источников в материковой Греции	76
Обжиров А.И. Газогеохимический метод оценки сейсмической активности и прогноза землетрясений	78
Остапчук А.А. Структурные особенности интерфейса тектонического разлома по данным слабой сейсмичности.....	80

Павленко В.А., Завьялов А.Д. Сравнительный анализ методов оценки магнитуды представительной регистрации землетрясений.....	82
Писаренко В.Ф. Оценка параметров усеченного распределения Гутенберга – Рихтера.....	84
Подвигина О.М. Гетероклинические сети и хаос.....	85
Подольская Е.С., Некрасова А.К., Прохорова Т.В., Трубенков А.В., Селюцкая О.В. Web-ГИС обеспечение проектов ИТПЗ РАН	87
Пулинец С.А., Богданов В.В. Холистический подход к проблеме краткосрочного прогноза землетрясений в свете современной физической модели генерации предвестников.....	89
Родкин М.В. Метод анализа ООСЗ – приложения к проблемам физики и прогноза землетрясений	91
Родкин М.В., Корженков А.М., Николаева С.Б., Орунбаев С.Ж. PGVEM – метод независимой оценки долгосрочной сейсмической опасности по полевым данным?.....	93
Ружич В.В., Левина Е.А. Опыт среднесрочного прогноза опасных землетрясений в Байкальской рифтовой зоне.....	95
Сафронов А.Н. Новая теория эксплозивных и эффузивных вулканических извержений	97
Серебренников С.П., Джурик В.И., Ескин А.Ю. Материалы инженерно-сейсмологических исследований как основа для мониторинга сейсмической опасности Восточной Сибири.....	98
Скоркина А.А. О связи спектральных параметров и энергетических характеристик очага на примере землетрясений Дальневосточного региона	100
Скоркина А.А., Хажаев Р.Р. Почему сценарные землетрясения являются необходимым компонентом работ по оценке сейсмического риска	102
Соловьев А.А. Академик В.И. Кейлис-Борок (1921–2013) – 70 лет на переднем крае науки	104
Стром А.Л., Перетокин С.А., Зеленин Е.А., Гайдаленок О.В. К оценке M_{max} сейсмогенерирующих зон	105
Чертовских Р.А., Желиговский В.А. О разделении масштабов в задаче о кинематической генерации магнитного поля.....	107
Чураков Е.М. Оценки соболевских норм вторых производных по времени решений системы уравнений диффузионной магнитогидродинамики	109
Filippova A.I., Bukchin B.G., Fomochkina A.S. Source parameters of the september 21, 2020 Mw 5.6 Bystraya earthquake at the South-Western flank of the Baikal rift.....	110
Kazimov I.E., Kazimova S.E. Modern geodynamics of the eastern part of the Alpine-Himalayan folding belt according to GPS observations	112

Kostin V.M., Belyaev G.G., Ovcharenko O.Ya., Trushkina E.P. Impact of typhoon gay on lithospheric earthquakes	114
Novikov R.G. The problem of Gelfand – Krein – Levitan and passive imaging.....	116
Siegel C., Toledo P., Madariaga R., Campos J. Scaling of Seismic Hazard for the Northern Chile Earthquake Taxonomy	117
Yetirmishli G.J., Kazimova S.E. The structure of the Earth's crust by the method of seismotomography	118
Программа конференции	120

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ DPS ДЛЯ АНАЛИЗА СЕЙСМИЧНОСТИ: ПРИБАЙКАЛЬЕ

Агаян А.С.^{1,2}, Некрасова А.К.²

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
геологический факультет, г. Москва, Россия*

² *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики
РАН, г. Москва, Россия*

E-mail: nastaagaian@mail.ru

(стендовый доклад)

Байкальский регион – один из самых сейсмоактивных регионов Российской Федерации с относительно высокой численностью населения. В работе представлены результаты применения алгоритма топологической фильтрации DPS для анализа сейсмичности Прибайкалья, а именно: проведен анализ пространственной кластеризации сейсмических событий, зарегистрированных Байкальским отделением геофизической службы Федерального исследовательского центра Российской академии наук за период с 1994 по 2019 год [Baikal Division...].

Алгоритм топологической фильтрации основан на строгом определении для многомерного массива понятия сгущения [Агаян, 2011; 2014]. Выделяемые в результате работы алгоритма кластеры (изолированные сгущения) являются плотными структурами на фоне полного множества. Анализ сейсмического потока с помощью алгоритма DPS лежит в основе распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений [Гвишиани, 2013; Дзебоев, 2018].

Набор точек (сейсмических событий при работе с каталогом землетрясений), выделенных алгоритмом как принадлежащие кластерам, определяется радиусом $r(q)$, который равен степенному среднему всех попарных расстояний множества точек, вошедших в кластеры. Q является изменяемым параметром алгоритма и определяет радиус поиска событий, принадлежащих одному кластеру. Значение $q = -2$ соответствует максимальному радиусу поиска при заданном уровне плотности кластеров β . β также является входным параметром алгоритма и принимает значения от -1 до $+1$. Выделенные алгоритмом кластеры характеризуются локальной плотностью в точке, которая для каждого кластера, выделенного при фиксированных значениях q и β , больше или равна α . Используемая в работе версия алгоритма DPS не учитывает энергетическую величину сейсмических событий. Также в проведенном анализе не учитывалась глубина сейсмических событий. Таким образом, принадлежность/непринадлежность сейсмического события кластеру определяется его положением в пространстве «широта-долгота» относительно положения других событий в этом пространстве. Изучение устойчивости формирования пространственных кластеров

сейсмических событий при изменении магнитудного и временного диапазона является одной из задач настоящего исследования.

Кластеры сейсмических событий с помощью алгоритма DPS определены для всех 8310 землетрясений с магнитудами более 2.5 из регионального каталога Прибайкалья с апреля 1994 г. по декабрь 2019 г.

В табл. 1 представлены результаты работы алгоритма DPS для полного каталога: число кластеров, определенных алгоритмом (Ncl); число сейсмических событий, вошедших в кластеры (Neq); локальная плотность массива в точке α . Пример работы алгоритма DPS для полного каталога сейсмических событий Прибайкалья, $q = -2.0$, $\beta = -0.5$, $\alpha = 6.4$, представлен на рис. 1. Различными цветами на схеме, дополняющей карту эпицентров, показаны события, принадлежащие разным кластерам.

Таблица 1. Параметры кластеров, выделенных алгоритмом DPS, $M > 2.5$, 04.1994 г.–12.2019 г.

β	q								
	$-2, r = 20.631 \text{ км}$			$-2.5, r = 12.205 \text{ км}$			$-3, r = 8.190 \text{ км}$		
	Ncl	Neq	α	Ncl	Neq	α	Ncl	Neq	α
-0.50	18	5916	6.4	34	5588	3.5	50	5307	2.4
-0.25	16	4260	14.2	30	4121	7.5	37	4061	4.9
0	10	3577	30.3	11	3349	16.2	14	3233	10.2
0.25	4	2635	70.1	6	2589	38.4	7	2499	23.6

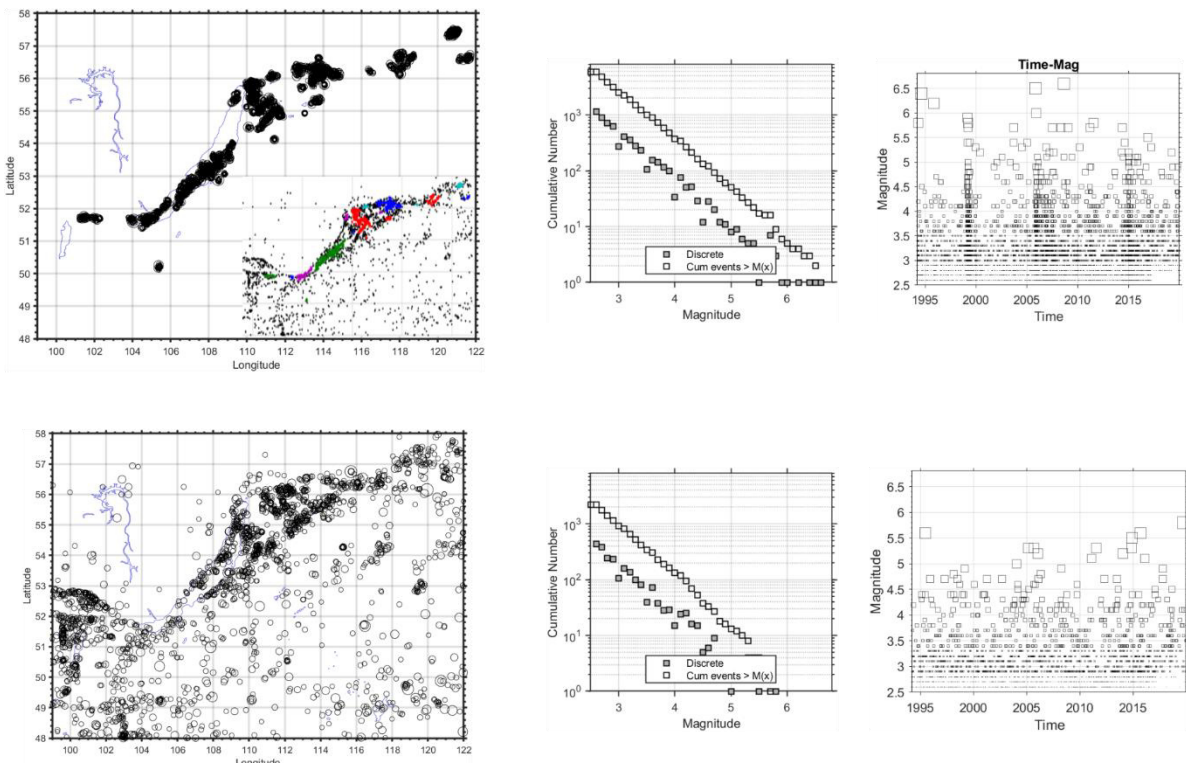


Рис. 1. Кластеры, выделенные алгоритмом DPS, $q = -2.0$, $\beta = -0.5$, $M > 2.5$, 04.1994 г.–12.2019 г. Карта сейсмических событий, распределение числа сейсмических событий в зависимости от магнитуды и распределение

магнитуд сейсмических событий в зависимости от времени. События, вошедшие в кластеры (*верхний ряд*), события, не вошедшие в кластеры (*нижний ряд*). Одинаковым цветом на дополнительной схеме представлены события, принадлежащие одному кластеру, черным показаны события, не вошедшие в кластеры

Дополнительно проведен анализ работы алгоритма DPS для каталога основных толчков (табл. 2). Декластеризация регионального каталога Прибайкалья методом ближайшего соседа описана в работе [Nekrasova, 2022]. Всего каталог основных толчков включает 3989 событий. Пример выделения кластеров по каталогу основных событий для параметров алгоритма DPS $q = -2.0$, $\beta = -0.5$ приведен на рис. 2.

Таблица 2. Параметры кластеров, выделенных алгоритмом DPS, по каталогу основных толчков Прибайкалья, $M > 2.5$, 04.1994 г.–12.2019 г.

β	q								
	$-2, r = 58.421 \text{ км}$			$-2.5, r = 30.533 \text{ км}$			$-3, r = 18.098 \text{ км}$		
	Ncl	Neq	α	Ncl	Neq	α	Ncl	Neq	α
-0.5	7	3107	7.6	11	2993	3.3	17	2793	1.9
-0.25	4	2505	15.5	11	2454	6.2	20	2322	3.4
0	3	1432	26.7	6	1703	10.5	17	1509	5.5
0.25	2	517	43.4	4	550	16.9	7	466	8.6

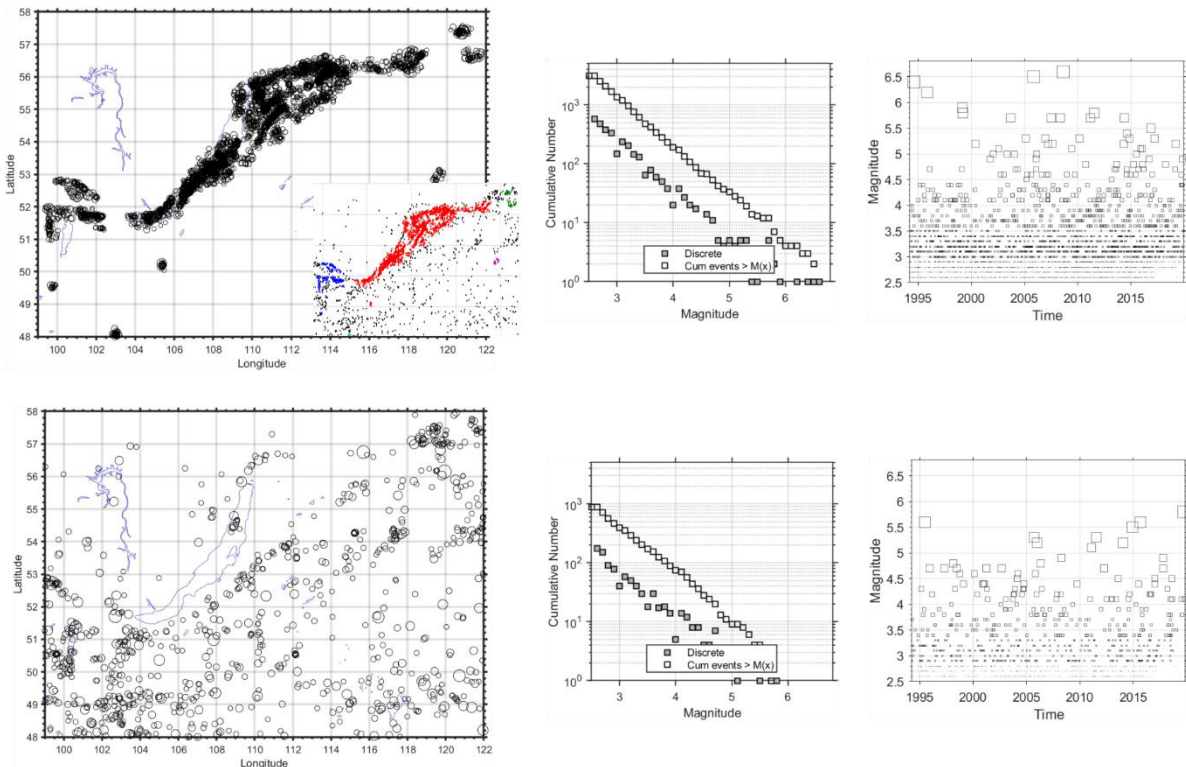


Рис. 2. Кластеры, выделенные алгоритмом DPS, $q = -2.0$, $\beta = -0.5$, основные события, $M > 2.5$, 04.1994 г.–12.2019 г. Карта сейсмических событий, распределение числа сейсмических событий в зависимости от магнитуды и распределение магнитуд сейсмических событий в зависимости от времени. События, вошедшие в кластеры (*верхний ряд*), события, не вошедшие в кластеры (*нижний ряд*). Схема – аналогично рис. 1

Сравнение геометрии и пространственного распределения кластеров различной плотности сгущения с геоморфологическими параметрами региона, а также с параметрами Общего закона подобия для землетрясений планируется выполнить в продолжении представленной работы.

Учет энергетической величины анализируемых событий представляется необходимым дополнением к актуальной версии алгоритма DPS.

Литература

- Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Добровольский М.Н.* Об одном алгоритме поиска плотных областей и его геофизических приложениях // Доклады 15-й Всероссийской конференции «Математические методы распознавания образов. ММРО-15». 2011. С. 543–546.
- Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Добровольский М.Н.* Дискретные совершенные множества и их применение в кластерном анализе // Кибернетика и системный анализ. 2014. Т. 50. № 2. С. 17–32.
- Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Добровольский М.Н., Дзбоев Б.А.* Объективная классификация эпицентров и распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии // Геоинформатика. 2013. № 2. С. 44–57.
- Дзбоев Б.А., Агаян С.М., Жарких Ю.И., Красноперов Р.И., Барыкина Ю.В.* Зоны возможного возникновения эпицентров сильнейших землетрясений Камчатки // Физика Земли. 2018. № 2. С. 96–103. DOI:10.7868/S0002333718020084
- Baikal Division of the Geophysical Survey, Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. Homepage: <http://www.seis-bykl.ru/modules.php?name=Data&da=1>; last accessed 2020/12/10.
- Nekrasova A., Kossobokov V.* Unified Scaling Law for Earthquakes: Lake Baikal Region // Problems of Geocosmos-2020. Proceedings Springer, Section S. 2022.

ИЕРАРХИЧЕСКАЯ РАНЖИРОВАННОСТЬ И МАСШТАБНАЯ ИНВАРИАНТНОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ТЕРРИТОРИИ ДАГЕСТАНА

Адилов З.А., Асекова З.О.

Дагестанский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Махачкала, Россия

E-mail: adilov79@mail.ru

(стендовый доклад)

Вопрос взаимозависимости мер (в частном случае геометрий) систем и поведений систем на разных масштабных уровнях является широко обсуждаемым [Мандельброт, 2002; Шерман, 1998]. Одна из форм взаимозависимости проявляется в самоподобии (фрактальности) структур систем и их поведения на разных масштабных уровнях. Для сейсмического процесса характерна форма самоподобия, которая выражается в виде степенной зависимости некоторой функции $f(x)$ от параметра x : $f(x) = \text{const}/x^\gamma$, имеющей вид линейной зависимости в билогарифмическом масштабе. Известными примерами являются зависимости между числом повторяемости N^* и энергией E землетрясений (1), между размерами очага L и энергией E землетрясений (2) и другие:

$$\lg N^* = \alpha - \gamma \lg E, \quad (1)$$

$$\lg L = \beta \lg E - \kappa. \quad (2)$$

Параметры α и γ , β и κ , фигурирующие в уравнениях (1) и (2), не являются постоянными, а меняются в ходе сейсмического процесса. Поэтому сейсмический процесс – процесс мультифрактальный.

На региональном уровне территории Дагестана и прилегающих районов выявлен кольцевой характер сейсмичности, обусловленный, на наш взгляд, иерархически ранжированной системой геологических вихревых структур фрактального типа. Обнаруживается увеличение размеров кольцевых структур от меньшего ранга к большему с коэффициентом, близким к двум.

В соответствии с полученными результатами исследования сейсмический процесс на территории Дагестана и прилегающих районов иерархически ранжирован, масштабно-инвариантен (самоподобен), описывается канторовым множеством и носит характер кольцевой активности.

Литература

Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.

Шерман С.И. Фрактальный анализ в разломной тектонике // Тектоника и геодинамика: общие и региональные аспекты. М.: ГЕОС, 1998. Т. 2. С. 274–276.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Александров П.Н.¹, Непеина К.С.²

¹ *Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия*

² *Научная станция РАН в г. Бишкеке, г. Бишкек-49, Кыргызстан*

E-mail: neks@gdirc.ru

(устный доклад)

Исторически мониторингом занимаются в пределах Бишкекского геодинамического полигона (БПП) с помощью различных геофизических методов уже более 40 лет [Баталев, 2019]. Своё особое место занял электромагнитный мониторинг, проводимый как в активном, так и в пассивном режиме. Активный – нацелен на слежение за изменением во времени петрофизических характеристик горных пород. Пассивный – изучает источники, их характеристики и локацию местоположения области генерации [Непеина, 2017]. Наиболее чувствительным параметром среди петрофизических характеристик является неоднородность, формирующаяся за счет анизотропии свойств. В этом отношении задача об определении чувствительности макроанизотропных параметров, в результате перестройки структурно-текстурных связей, неизбежно приводит к вопросу: в каком ключе развивать наблюдения?

Решение обратных задач геофизики для однородно-анизотропных сред с использованием теории эффективных сред позволяет развивать подход к мониторингу с иной точки зрения. Для этого необходимо корректно ввести систему наблюдений и теоретические методы (и границы применимости) для обработки результатов. Так, через бианизотропные параметры могут быть обобщены физические характеристики трещиноватых сред. Тогда можно рассматривать трещину как элементарный источник, а процесс раскрытия/появления в результате необратимых деформаций горной породы в разных точках пространства – как движущийся источник. Эти необратимые изменения горных пород представляют собой объект исследования пассивного сейсмоэлектромагнитного мониторинга лет [Баталев, 2018]. Необратимые деформации горной породы, вследствие напряженно-деформированного состояния литосферы, приводят к появлению связанных явлений – сейсмоакустической эмиссии (САЭ) и электромагнитного излучения (ЭМИ). Одни из первых работ в данном направлении принадлежат Борису Сергеевичу Светову [Светов, 1992; 1997]. Он проанализировал и сформулировал идеологию мониторинга. П.Н. Александров формализовал рабочую гипотезу наблюдений ЭМИ и САЭ [Александров, 2009].

В 2016–2020 гг. были проведены экспериментальные работы [Непеина, 2019; Rybin, 2020], позволившие определить новое направление в системе постановки мониторинга современных геодинамических процессов, происходящих в земной коре сейсмоактивных регионов, с помощью комплексного анализа сейсмического и электромагнитного полей эндогенного происхождения, в том числе и землетрясений.

В результате развития теории к настоящему времени появилась возможность определять перспективные направления геофизического мониторинга для изучения современных геодинамических процессов, что позволит на основании выявленных закономерностей приблизиться к пониманию возникновения землетрясений в сейсмически активных регионах.

Исследование ведется в рамках государственного задания НС РАН АААА-А19-119020190063-2, АААА-А19-119020190064-9 и научного проекта РФФИ № 20-05-00475.

Литература

- Александров П.Н.* К теории сейсмического и электромагнитного мониторинга современных геодинамических процессов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. Вып. 14. № 2. С. 49–58.
- Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е., Рыбин А.К.* Изучение необратимых деформаций в литосфере Тянь-Шаня по магнитотеллурическим данным (методологический аспект) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2019. Вып. 42. № 2. С. 42–56. DOI: 10.31431/1816-5524-2019-2-42-42-56
- Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Рыбин А.К., Александров П.Н., Матюков В.Е., Непеина К.С., Забиякова О.Б., Казначеев П.А.* Теоретические обоснования исследований деформационных процессов в литосфере Земли на основе сейсмических и электромагнитных полей эндогенного происхождения // Колл. моногр. Математическое моделирование процессов и систем по материалам пленарных докладов VIII Междунар. молод. науч.-практ. конф. / Отв. ред. С.А. Мустафина. Стерлитамак: Башкирский государственный университет, 2018. С. 95–122.
- Непеина К.С., Казначеев П.А., Александров П.Н.* Сейсмический мониторинг современных геодинамических процессов с использованием градиентной установки // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2019. Вып. 44. № 4. С. 84–92. DOI: 10.31431/1816-5524-2019-4-44-84-92.
- Непеина К.С., Собисевич А.В.* Геофизический мониторинг как этап устойчивого развития в целях достижения глобальной безопасности // Материалы V международного научного конгресса Глобалистика-2017. Секция III. Устойчивое развитие. МГУ имени М.В. Ломоносова. Москва, 2017. С. 107–108.
- Светов Б.С.* Электромагнитный мониторинг сеймотектонических процессов // Известия вузов. Геология и разведка. 1992. № 2. С. 99–116.
- Светов Б.С., Каринский С.Д., Кукса Ю.И., Одинцов В.И.* Магнитотеллурический мониторинг геодинамических процессов // Физика Земли. 1997. № 5. С. 36–46.
- Rybin A., Bataleva E., Nepeina K., Matiukov V., Alexandrov P., Kaznacheev P.* Response of cracking processes in variations of geophysical fields // Journal of Applied Geophysics. 2020. V. 181. Article 104144. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2020.104144

ОЦЕНКА ОПТИМИЗАЦИИ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ЭЙЛЕРА ПОЛУЛАГРАНЖЕВЫМ МЕТОДОМ

Андреев Е.В.

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

E-mail: andreev@mitp.ru

(устный доклад)

Работа посвящена ускорению вычисления численного решения уравнения Эйлера методом Коши – Лагранжа [Podvigina, 2016]. В данном методе лагранжево смещение раскладывается во временной ряд Тейлора, где коэффициенты разложения вычисляются по рекуррентным соотношениям [Zheligovsky, 2014]. Суммируя ряд Тейлора, можно вычислить эйлеровы координаты жидких частиц через любой промежуток времени, ограниченный сверху радиусом сходимости ряда. Радиус сходимости определяется эмпирически сравнением поведения коэффициентов ряда Тейлора с геометрической прогрессией.

Аппроксимация Паде – это аппроксимация степенного ряда отношением двух полиномов. Из-за наличия большого числа сингулярностей в решении уравнения Эйлера при комплексификации времени она в принципе может дать лучшее приближение функции, чем суммирование усеченного ряда Тейлора, и давать достаточно точный результат при тех временах, при которых ряд Тейлора не сходится. Дело в том, что аппроксимация Паде, как отношение полиномов, позволяет обходить некоторые сингулярности типа полюс, учитывая их в знаменателе (в задаче, рассмотренной в [Frisch, 2003], такие сингулярности действительно оказались полюсами). В этом случае возможно брать шаг по времени больше, чем радиус сходимости временного ряда Тейлора.

Я проверил данную гипотезу, используя для сравнения двумерное течение с квадратной ячейкой периодичности, рассмотренное в [Podvigina, 2016]. Тестовые расчеты показали, что использование аппроксимации Паде даже в этом относительно простом случае не дает желаемый результат – прежде всего из-за того, что коэффициенты разложения в ряд Тейлора старших гармоник зашумлены ошибками округления.

Численные эксперименты были продолжены с использованием для расчета указанного течения исходного полулагранжева алгоритма с постоянными шагами по времени. Если в расчетах [Podvigina, 2016] при использовании 16 членов в ряде Тейлора с разрешением 1024^2 гармоник шаги падали от 0.3 до 0.26, то мои расчеты показывают, что использование шага 0.5 и даже 0.8 дает достаточно точное решение (см. рис. 1). Таким образом, критерий выбора величины временного шага на основе сравнения с геометрической прогрессией, использованный в [Podvigina, 2016], далек от оптимального.

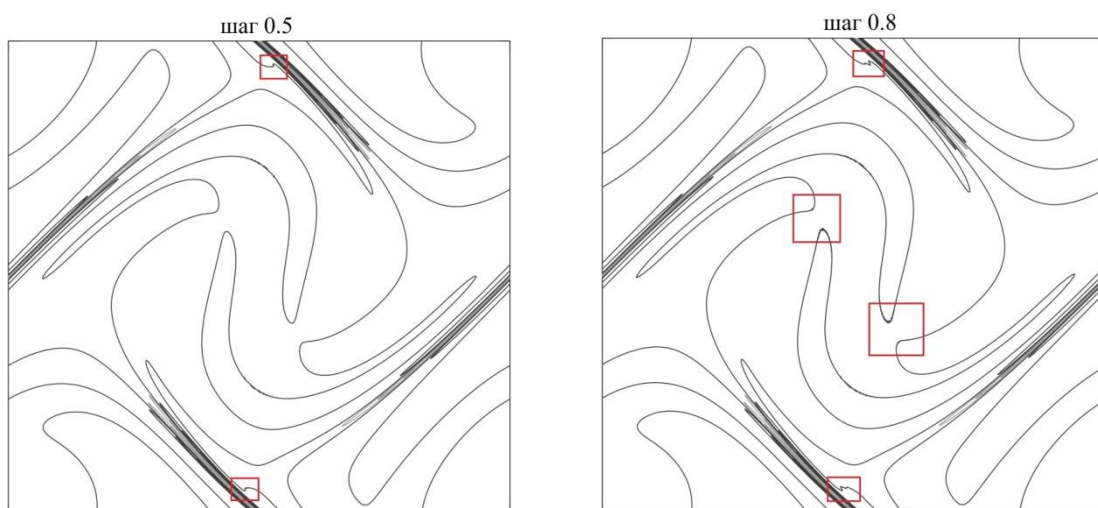


Рисунок 1. Изолинии лапласиана завихренности (шаг изолиний 500) в момент времени $t = 4$, вычисленные при использовании 16 членов в ряде Тейлора с разрешением 1024^2 гармоник с шагами 0.5 и 0.8

Литература

- Frisch U., Matsumoto T., Be J.* Singularities of Euler Flow? Not Out of the Blue! // *J. Stat. Phys.* 2003. V. 113. P. 761–781. DOI:10.1023/A:1027308602344
- Podvigina O., Zheligovsky V., Frisch U.* The Cauchy–Lagrangian method for numerical analysis of Euler flow // *J. Computational Physics.* 2016. V. 306. P. 320–342. DOI:10.1016/j.jcp.2015.11.045
- Zheligovsky V., Frisch U.* Time-analyticity of Lagrangian particle trajectories in ideal fluid flow // *J. Fluid Mechanics.* 2014. V. 749. P. 404–430. DOI:10.1017/jfm.2014.221

ОЦЕНКА МАГНИТУДЫ СИЛЬНЕЙШЕГО АФТЕРШОКА В ХИБИНСКОМ МАССИВЕ

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

¹ Кольский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Апатиты, Россия

² Кировский филиал АО «Апатит», г. Кировск, Россия

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

E-mail: bars.vl@gmail.com

(устный доклад)

Рассматривается оценка магнитуды сильнейшего афтершока в зависимости от времени в условиях природно-техногенной сейсмичности Хибинского массива, Кольский полуостров. Показано, что средняя разность магнитуд сильнейших афтершоков и их основных толчков подчиняется динамическому закону Бота, ранее полученному нами для тектонических землетрясений.

В тектонически нагруженных массивах горных пород добыча полезных ископаемых часто приводит к возникновению техногенной сейсмичности, результатом которой могут быть катастрофические проявления сейсмических событий в виде внезапного обрушения консоли налегающих пород, горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений [Козырев, 2016]. Как и в случае тектонической сейсмичности, такие землетрясения могут вызывать повторные толчки, или афтершоки (см., например, [Козырев, 2016; Козырев, 2018]).

В местах добычи полезных ископаемых афтершоки представляют самостоятельную опасность, поскольку элементы горных выработок, получившие скрытые повреждения в результате основного толчка, могут быть разрушены серией более слабых повторных толчков. Учитывая, что при ведении горных работ в зоне афтершоковой активности могут находиться люди и техника, задача оценки магнитуды ожидаемого сильнейшего афтершока приобретает особую актуальность.

В настоящей работе на примере природно-техногенной сейсмичности Хибинского массива показано, что распределение разности магнитуды сильнейшего афтершока и основного толчка подчиняется динамическому закону Бота, полученному нами ранее для тектонических землетрясений [Баранов, 2019].

В качестве исходных данных использованы результаты сейсмического мониторинга, проводимого Кировским филиалом АО «Апатит» с 1996 г. [Корчак, 2014]. Данные являются представительными начиная с нулевой магнитуды.

Согласно [Баранов, 2019], средняя разность магнитуды основного толчка (M_m) и сильнейшего афтершока (M_1) в зависимости от времени имеет вид:

$$E[m_1(t, T)] = m_c + \frac{1}{b_a} \lg[\Lambda_{\Delta M}(0, T)] + \frac{1}{b} \lg\left(\frac{D(t, T; c, p)}{D(0, T; c, p)}\right). \quad (1)$$

Здесь $m_1(t, T) = M_1(t, T) - M_m$ – разность магнитуд сильнейшего афтершока (M_1) и основного толчка (M_m) на интервале времени (t, T) после основного толчка; b – наклон графика повторяемости, оцененный по набору афтершоковых серий; $m_c = M_c - M_m$ – представительная магнитуда, заданная относительно магнитуды основного толчка; $\Lambda_{\Delta M}(0, T)$ – параметр закона продуктивности [Shebalin, 2020], оценкой которого является среднее число инициированных событий с магнитудой $M \geq M_m - \Delta M$ на интервале времени ($0, T$); $D(t, T, c, p)$ и $D(0, T, c, p)$ – интегралы от закона Омори-Усу с параметрами c, p на отрезках времени (t, T) и ($0, T$), соответственно.

Выражение (1) и соответствующая ему функция распределения (см. [Баранов, 2019]) получены исходя из закона продуктивности [Shebalin, 2020], согласно которому число афтершоков распределено экспоненциально. В работе [Баранов, 2020] мы показали, что афтершоковая активность в Хибинском массиве подчиняется закону продуктивности. При этом землетрясение с $M_m \geq 1.5$ инициирует в среднем 2.7 сейсмических события с магнитудами $M_m - 1.5$ или выше, то есть при сделанных обозначениях $\Lambda_{1.5} = 2.7$. Для остальных параметров модели (1) получились следующие оценки: $b = 1.19 \pm 0.09$, $c = 0.013 \pm 0.008$ суток, $p = 1.22 \pm 0.056$ (с учетом 95% доверительных интервалов).

Соответствие фактических и модельных значений средних разностей магнитуд сильнейших афтершоков и основных толчков довольно хорошее (рис. 1). Таким образом, выражение (1) может быть использовано для оценки ожидаемой магнитуды сильнейшего афтершока сразу после того, как произошло землетрясение с магнитудой 1.5 или выше.

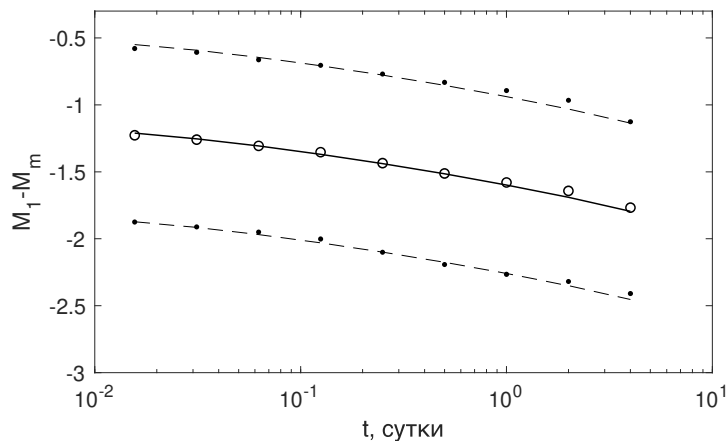


Рис. 1. Сравнение фактических и модельных значений средних разностей магнитуд сильнейших афтершоков и основных толчков $E[M_1(t, 90) - M_m]$, рассчитанных по формуле (1). Кружки (точки) – фактические значения $E[M_1(t, 90) - M_m]$ (плюс/минус фактические стандартные отклонения); сплошная (пунктирная) линия – модельные значения $E[M_1(t, 90) - M_m]$ (плюс/минус модельные стандартные отклонения)

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 20-17-00180.

Литература

- Баранов С.В., Жукова С.А., Корчак П.А., Шебалин П.Н.* Продуктивность техногенной сейсмичности // Физика Земли. 2020. № 3. С. 40–51. DOI:10.31857/S0002333720030011
- Баранов С.В., Шебалин П.Н.* Закономерности постсейсмических процессов и прогноз опасности сильных афтершоков. М.: РАН, 2019. 218 с.
- Козырев А.А., Семенова И.Э., Журавлева О.Г., Пантелеев А.В.* Гипотеза происхождения сильного сейсмического события на Расвумчоррском руднике 09.01.2018 // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-Технический Журнал). 2018. № 12. С. 74–83. DOI:10.25018/0236-1493-2018-12-0-74-83
- Козырев А.А., Семенова И.Э., Рыбин В.В., Панин В.И., Федотова Ю.В.* Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Хибинские апатит-нефелиновые месторождения). Апатиты: ООО «Апатит-Медиа», 2016. 112 с.
- 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.
- Shebalin P.N., Narteau C., Baranov S.V.* Earthquake Productivity Law // Geophysical Journal International. 2020. V. 222. P. 1264–1269. DOI:10.1093/gji/ggaa252

УЧАСТКИ ПРЕДЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ КАК СРЕДА ДЛЯ ТЕХНОГЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Батугин А.С.

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
г. Москва, Россия*

E-mail: as-bat@mail.ru

(устный доклад)

В развитие представлений проф. Петухова И.М. о предельно напряженном состоянии земной коры [Петухов, 1999] рассматриваются условия возникновения сильных горных ударов и землетрясений в индустриальных районах с глубоким расположением гипоцентра, техногенная природа которых является предметом дискуссий.

Отмечены такие общие черты проявления сильных горных ударов и техногенных землетрясений, как соответствие направлений смещений крыльев крупных реактивированных тектонических нарушений региональному полю напряжений во время геодинамического события; характерное отношение размера очаговой зоны и глубины гипоцентра; расположение гипоцентра глубже зоны ведения горных работ или в стороне.

Например, Бачатское землетрясение, произошедшее под одноименным угольным разрезом в Кузбассе в 2013 г., имело магнитуду 6.1 и глубину гипоцентра 4 км [Еманов, 2014]. Для объяснения феномена влияния горных работ на проявление такого крупного сейсмического события с гипоцентром на большой глубине делается предположение, что накануне землетрясения в районе Бачатского разреза в массиве горных пород существовала зона предельно напряженного состояния, возникшая в результате взаимодействия крупных (100–200 км) блоков земной коры. Размер этой зоны оценен в 10 км исходя из магнитуды события и представлений об его очаговой зоне как зоне деструкции и предельно напряженного состояния. Делается вывод, что при размере очага геодинамического явления 10 км зона предельно напряженного состояния массива располагалась от земной поверхности до глубины в несколько километров. В этом случае антропогенное воздействие (ведение горных работ) осуществлялось с поверхности непосредственно на эту зону, что могло послужить триггерным эффектом землетрясения с глубиной гипоцентра 4 км. Предполагается, что подобную природу имели и другие сильные землетрясения с глубиной очага в несколько километров и более, техногенная природа которых обсуждается в литературе [Батугин, 2021].

Глубина распространения слоя предельно напряженного состояния земной коры может быть оценена по максимальным глубинам гипоцентров землетрясений в регионе. Поскольку мощность этого слоя переменчива, это может служить основанием для

классификации участков земной коры по степени геодинамической опасности [Batugin, 2020].

Литература

- Батугин А.С.* Общие закономерности проявления сильных горных ударов и техногенных землетрясений на участках земной коры с предельно напряженным состоянием // Горный журнал. 2021. № 1. С. 22–27. DOI:10.17580/gzh.2021.01.04
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Лескова Е.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г.* Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса (Бачатское землетрясение 18 июня 2013) // ФТПРПИ. 2014. № 2. С. 41–46.
- Петухов И.М., Батугина И.М.* Геодинамика недр. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра коммуникейшенс ЛТД, 1999. 256 с.
- Batugin A.* A proposed classification of the Earth's crustal areas by the level of geodynamic threat // Geodesy and Geodynamics. 2020. № 12(1). P. 21–30. DOI:10.1016/j.geog.2020.10.002

ИССЛЕДОВАНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В СИСТЕМЕ ЛИТОСФЕРА-АТМОСФЕРА-ИОНОСФЕРА В ПЕРИОД ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ИТАЛИИ 24 АВГУСТА 2016 Г. ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова Е.В., Воронова О.С., Феоктистова Н.В.

*Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга
«АЭРОКОСМОС», г. Москва, Россия*

E-mail: office@aerocosmos.info

(стендовый доклад)

Изучение механизмов взаимосвязей между процессами, происходящими в литосфере, атмосфере и ионосфере, является важной задачей для составления реального прогноза землетрясений, позволяющей исключить или уменьшить влияние шумов, которые приводят к увеличению ложных тревог [Бондур, 2009]. Меньше всего споров вызывает, конечно, долгосрочный прогноз. Такие прогнозы составляются сроком от нескольких месяцев до нескольких лет. Среднесрочный прогноз позволяет предсказать землетрясение за несколько месяцев до него [Davis, 2012]. В основе такого прогноза лежат наблюдения за геофизическими полями. К краткосрочным прогнозам предъявляют большие требования. Ведь от точности таких прогнозов зависят тысячи человеческих жизней. Эффективный краткосрочный прогноз возникновения и развития стихийных природных и техногенных бедствий на Земле обеспечивает снижение человеческих и материальных потерь и в настоящее время приобретает все большую актуальность [Соболев, 2003; Keilis-Borok, 2004; Бондур, 2009; 2021].

Основной целью комплексных исследований аномалий геофизических полей в период подготовки и протекания сильных сейсмических событий является экспериментальное подтверждение возможности прогноза предвестников землетрясений в сейсмоопасном регионе на основе космических данных и вспомогательной информации [Бондур, 2020].

В настоящем исследовании проводился пространственно-временной анализ аномальных возмущений, обнаруженных в атмосфере и ионосфере, а также анализ линеаментных систем в период подготовки и протекания землетрясения в Италии 24 августа 2016 г. по данным космического мониторинга.

Используемый метод основан на комплексном анализе временных серий геофизических предвестников, таких как статистические показатели линеаментных систем, изменения температур поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, вариации уходящего длинноволнового излучения и аэрозольной оптической толщины, а также изменения полного электронного содержания (ТЕС). Особенностью предлагаемого подхода является алгоритм подбора пространственного домена для анализа сейсмоопасных зон в зависимости от масштаба исследования и анализируемых параметров. В рассматриваемом

регионе нами были выделены три подобные зоны, расположенные на расстоянии 300–400 км друг от друга. Используемые космические данные имеют пространственное разрешение порядка 100–250 км. В качестве центра зоны осреднения был выбран медианный центр зоны высокого риска возникновения сильных землетрясений в центральной Италии, далее были построены 3 зоны с радиусом 150, 200 и 350 км.

Для выявления тепловых предвестников землетрясений в Италии были использованы ежедневные данные прибора AIRS (спутник Aqua) со значениями уходящего длинноволнового излучения (OLR), температуры поверхности (SurfSkinTemp), температуры приповерхностного слоя атмосферы (SurfAirTemp) [Hearty, 2013].

Для исследования динамики состояния аэрозолей в атмосфере в период подготовки и протекания сильных землетрясений был выбран параметр аэрозольной оптической толщины (Aerosol Optical Depth (AOD)), содержащийся в продукте MCD19A2 уровня L2. Информационный продукт MCD19A2 объединяет данные спутников Terra и Aqua [Lyapustin, 2018].

Для выявления ионосферных предвестников рассматривались вариации полного электронного содержания (TEC), полученные по данным спутниковой навигационной системы GPS наземными станциями aqu1, bzrg, ieng, mate, not1 и unpg [Ciraolo, 1997], а также данные глобальных ионосферных карт GIM [Noll, 2010].

Для выявления геодинамических предвестников проанализированы временные ряды региональных и локальных линеаментов (розы-диаграммы региональных линеаментов и плотности локальных линеаментов), построенные по фрагментам изображений с разрешением 250 метров (MOD02QKM), полученных аппаратурой MODIS спутника Terra [<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>].

Совместный анализ этих геофизических полей позволил выявить последовательность появления аномалий перед землетрясениями, что подтверждает модель литосферно-атмосферно-ионосферного взаимодействия. В то же время использование совместного (многопараметрического) анализа различных геофизических полей, регистрируемых из космоса, обеспечивает повышение точности и достоверности выявления аномальных вариаций, связанных с подготовкой землетрясений, при мониторинге сейсмоопасных территорий.

Литература

Бондур В.Г., Гохберг М.Б., Гарагаи И.А., Алексеев Д.А. Ранние проявления краткосрочных предвестников в динамике напряженно-деформированного состояния Южной Калифорнии // Физика Земли. 2021. № 4. С. 78–90. DOI:10.31857/S0002333721040049

- Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П.* Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М.: Научный мир, 2009. 692 с.
- Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова Е.В., Воронова О.С.* Совместный анализ аномалий различных геофизических полей, регистрируемых из космоса, при подготовке сильных землетрясений в Калифорнии // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 5. С. 3–24. DOI:10.31857/S0205961420050036
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
- Ciraolo L., Spalla P.* Comparison of ionospheric total electron content from the Navy Navigation Satellite System and the GPS // Radio Sci. 1997. V. 32. P. 1071–1080.
- 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
- Hearty T., Savtchenko A., Theobald M., Ding F., Esfandiari E., Vollmer B.* Readme document for AIRS version 006 products, Readme, NASA GES DISC Goddard Earth Sci. Data and Inf. Serv. Cent., Greenbelt, Md. 2013. 14 p.
- Keilis-Borok V., Shebalin P., Gabrielov A., Turcotte D.* Reverse tracing of short-term earthquake precursors // Physics of The Earth and Planetary Interiors. 2004. V. 145. № 1–4. С. 75–85.
- Lyapustin A., Wang Y.* MCD19A2 MODIS/Terra+Aqua Land Aerosol Optical Depth Daily L2G Global 1km SIN Grid V006 [Data set] // NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2018. 19 p. DOI:10.5067/MODIS/MCD19A2.006
- Noll C.* The Crustal Dynamics Data Information System: A resource to support scientific analysis using space geodesy // Advances in Space Research. V. 45. № 12. P. 1421–1440. DOI:10.1016/j.asr.2010.01.018

О ФИЗИЧЕСКОМ СМЫСЛЕ КРИТЕРИЕВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СЕЙСМОЛОГИИ

Ботвина Л.Р.¹, Завьялов А.Д.²

¹ *Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
г. Москва, Россия*

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

E-mail: lbotvina@imet.ac.ru

(устный доклад)

Методами механических испытаний, акустической эмиссии и металлографии изучены закономерности множественного разрушения металлических образцов на различных стадиях статического и циклического растяжения. Построены кумулятивные распределения микротрещин по размерам [Ботвина, 1995; Rotwain, 1997] и амплитудные распределения сигналов акустической эмиссии (АЕ), оценены значения угловых коэффициентов этих распределений (b_C и b_{AE} – параметры), а также размеры зон пластической деформации, характеризующие радиус корреляции процесса накопления повреждений (R_Y), периоды акустического затишья (ΔT_{AE}) перед разрушением образцов, концентрационные k -критерии разрушения, определена фрактальная размерность D_C картин множественного разрушения на различных стадиях нагружения.

По соотношению, используемому в сейсмологии ($1.5M = \log E - 4.8$), и энергии разрушения образцов определена магнитуда M^* разрушения, и установлена взаимосвязь этого параметра с логарифмом радиуса зоны локализации разрушения в образцах различной толщины ($\log R_Y \sim 0.94M^*$), а также с периодом акустического затишья ($\log T_{AE} = 0.5M^* - 0.5$) [Ботвина, 2001].

Показано, что S -функция, определяющая суммарную энергию землетрясений [Keilis-Borok, 1964], является аналогом функции поврежденности Качанова – Работнова (ω), широко используемой в механике и позволяющей оценивать скорость подготовки критического события [Ботвина, 1997].

Оценены концентрационные критерии разрушения k_C , k_{AE} , k_{SF} , характеризующие развитие поврежденности материала в процессе нагружения (k_C), поток сигналов акустической эмиссии (k_{AE}) и сейсмических событий (k_{SF}), зарегистрированных путем многолетнего мониторинга сейсмичности, изучены временные зависимости оцененных критериев, и показано, что они могут быть использованы для прогнозирования разрушения на разных его стадиях [Ботвина, 2021].

Исследована иерархия микротрещин, формирующихся в процессе циклического и статического нагружения металлических образцов [Ботвина, 2019], характеризующая последовательность изменения картин разрушения перед критическим событием.

Взаимосвязь механических и акустических характеристик с реальной картиной поврежденности материала образцов позволила установить физический смысл этих характеристик и их аналогов, используемых в сейсмологии.

Полученные результаты свидетельствуют об общей природе кинетических закономерностей, происходящих на разных масштабных уровнях, и о возможности использования критериев, известных в сейсмологии, для диагностики разрушения конструкций.

Работа выполнена при финансовой поддержке программ государственных заданий ИМЕТ РАН (№ 075-00947-20-00) и ИФЗ РАН (№ 0144-2019-0010).

Литература

- Ботвина Л.Р., Болотников А.И., Синев И.О.* Иерархия микротрещин при циклическом и статическом нагружении // Физическая мезомеханика. 2019. Т. 2. № 6. С. 24–36.
- Ботвина Л.Р., Завьялов А.Д., Синев И.О.* О временных зависимостях концентрационного параметра разрушения, оцененного разными методами // Доклады РАН. 2021. Т. 496. № 1. С. 87–93.
- Ботвина Л.Р., Опарина И.Б., Новикова О.В.* Анализ процесса накопления повреждений на различных масштабных уровнях // Металловедение и термическая обработка металлов. 1997. № 4. С. 17–22.
- Ботвина Л.Р., Ротвайн И.М., Кейлис-Борок В.И., Опарина И.Б.* О характере зависимости Гутенберга – Рихтера на различных стадиях накопления повреждений и подготовки землетрясений // Доклады РАН. 1995. Т. 345. С. 809–812.
- Ботвина Л.Р., Шебалин П.Н., Опарина И.Б.* Механизм временных вариаций сейсмичности и акустической эмиссии перед макроразрушением // Докл. РАН. 2001. Т. 376. № 4. С. 480–484.
- Keilis-Borok V.I., Malinovskaya L.N.* One regularity in the occurrence of strong earthquakes // J. Geophysical Research. 1964. V. 69. P. 3019–3025.
- Rotwain I.M., Keilis-Borok V.I., Botvina L.R.* Premonitory transformation of steel fracturing and seismicity // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1997. V. 101. P. 61–71.

КРИТЕРИЙ С-ОПТИМАЛЬНОСТИ ПЛАНОВ В ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Бурмин В.Ю.

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

E-mail: yburmin@yandex.ru

(стендовый доклад)

Предположим, что цель эксперимента – отыскание оценок некоторых неизвестных параметров p_j по наблюдаемым величинам f_i , причем связь между ними записывается в виде системы линейных алгебраических уравнений

$$\mathbf{K}\mathbf{p} = \mathbf{f}, \quad (1)$$

где \mathbf{K} – прямоугольная матрица полного ранга размерности $n \times m$ ($n \geq m$), вид которой определяется планом эксперимента; $\mathbf{f} = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ – наблюдаемый вектор; $\mathbf{p} = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ – искомый вектор. Если \mathbf{K} – матрица полного ранга, то существует единственное решение уравнения (1):

$$\mathbf{p} = \mathbf{K}^+ \mathbf{f},$$

где матрица \mathbf{K}^+ – обобщённая обратная к \mathbf{K} .

Величина $\|\mathbf{K}\| \|\mathbf{K}^+\|$ называется числом обусловленности матрицы \mathbf{K} и обозначается через $\text{cond}(\mathbf{K})$, а критерий оптимальности, связанный с минимизацией $\|\mathbf{K}^+\|$ или $\|\mathbf{K}\| \|\mathbf{K}^+\|$, критерием *С-оптимальности* (от condition) [Бурмин, 1976; 2019].

На базе критерия *С-оптимальности* были рассчитаны оптимальные конфигурации региональных сейсмологических сетей Юго-Восточной Азии, Вьетнама, Кавказа, Армении, Украины, а также глобальной сейсмологической сети [Бурмин, 1986; 1994; 2000; 2001; 2009; 2018; Burmin, 2020].

На рис. 1 представлена оптимальная геометрия глобальной сейсмологической сети [Бурмин, 1994]. Крестиками на рисунке обозначены сейсмические станции.

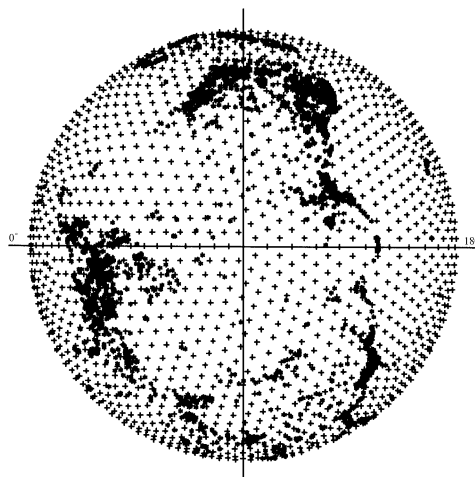


Рис. 1.

Представленная на рис. 1 система наблюдений при увеличении сейсмических станций ~40 тысяч будет регистрировать без пропусков землетрясения с магнитудой, равной 4.

На рис. 2 представлена оптимальная геометрия сейсмологической сети на территории Украины [Burmin, 2020].



Рис. 2.

Сейсмическая сеть на рис. 2 при увеличении сейсмографов 50 тысяч будет регистрировать внутри сети землетрясения с магнитудой 3.

Литература

- Бурмин В.Ю. Задача планирования эксперимента и обусловленность систем линейных уравнений // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1976. № 2. С. 195–200.
- Бурмин В.Ю. Некоторые обратные задачи сейсмологии. Теория, эксперименты, результаты. М.: Наука, 2019. 276 с.
- Бурмин В.Ю. Оптимальное расположение сейсмических станций при регистрации близких землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1986. № 5. С. 34–42.
- Бурмин В.Ю. Оптимальное расположение сейсмических станций на поверхности земного шара // Изв. РАН. Физика Земли. 1994. № 12. С. 1–9.
- Бурмин В.Ю., Нгуен Ван Фонг, Аветисян А.М. Планирование оптимальной региональной сети сейсмологических наблюдений на примере Армении // Вулканология и сейсмология. 2000. № 6. С. 66–79.
- Бурмин В.Ю., Нгуен Ван Фонг. Планирование оптимальной региональной сети сейсмологических наблюдений для Юго-Восточной Азии // Вулканология и сейсмология. 2001. № 1. С. 68–75.
- Бурмин В.Ю., Нго Тхи Лы, Чан Вьет Фыонг. Оценка эффективности современной и планирования оптимальной сети сейсмических станций на территории Вьетнама // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45. № 1. С. 27–35.
- Бурмин В.Ю. Оптимальная сеть сейсмологических наблюдений на Кавказе // Сейсмические приборы. 2018. Т. 54. № 3. С. 56–69. DOI: 10.21455/si2018.3-4
- Burmin V.Y., Shumlianska L.A. Design of the optimal seismological network in Ukraine // Pure Appl. Geophys. 2020. Vol. 177. № 8. P. 3651–3665. DOI: 10.1007/s00024-020-02453-9

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ИНДО-БИРМАНСКОЙ ДУГЕ

Воробьева И.А.¹, Горшков А.И.¹, Мандал П.²

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)

Индо-Бирманская дуга является границей между Индийской и Бирманской плитами. Наличие активной субдукции в этой зоне является спорным вопросом, поскольку Индийская плита сближается с Бирманской плитой под острым углом. Недавние измерения GPS в Бангладеш, Мьянме и северо-восточной Индии указывают на сближение 13–17 мм/год вдоль полого погружающейся Индийской плиты, в то время как сдвиги происходят в нескольких субвертикальных разломах, что согласуется с типичным распределением деформаций в зонах субдукции. Короткий период инструментально зарегистрированной сейсмичности и отрывочные исторические записи недостаточны для оценки возможности сильнейших землетрясений в Индо-Бирманской дуге. Используя преимущество блоковой модели динамики литосферы, позволяющей одновременно моделировать медленные тектонические движения и землетрясения, мы проверяем гипотезу о возможности сильных субдукционных землетрясений против гипотезы медленного асейсмического проскальзывания. Мы показали, что модель запертого мегатраста является предпочтительной, поскольку она более адекватно воспроизводит наблюдаемые тектонические скорости. Интегральные характеристики синтетической сейсмичности, магнитудно-частотное распределение землетрясения и уровень сейсмической активности согласуются с характеристиками инструментальной сейсмичности. Наши результаты показывают, что сильные землетрясения M8+ возможны в Индо-Бирманском мегатрасте. Предполагаемый период повторяемости сильнейших событий превышает тысячу лет. Землетрясения такого размера представляют большую угрозу для Бангладеш и Мьянмы, наиболее густонаселенных районов мира.

УЧЕТ ГРУППИРОВАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ВО ВРЕМЕНИ ПРИ ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

Герман В.И.^{1,2}

¹ Красноярский научно-исследовательский институт геологии и
минерального сырья, г. Красноярск, Россия

² Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

E-mail: german3v@yandex.ru

(устный доклад)

При оценке сейсмической опасности большое распространение получили оценки, представленные в виде карт значений сейсмической интенсивности I_T или пиковых ускорений грунта PGA_T со средним периодом повторяемости $T = 475 \approx 500$ годам. При этом такой повторяемости ставится в соответствие вероятность превышения значений I_T или PGA_T в течение $t = 50$ лет – $P = 10\%$. Такой подход, в частности, применялся в рамках крупных международных проектов GSHAP (Global Seismic Hazard Map), GEM (Global Earthquake Model), при составлении карт общего сейсмического районирования России ОСР-97, ОСР-2016 (для карт ОСР используются также периоды в 1000, 5000 и 10000 лет).

При составлении таких карт и определении вероятности P неявно предполагается стационарность сейсмического процесса с отсутствием последействия, которая, в частности, проявляется в том, что накопление землетрясений во времени описывается моделью простейшего, или, иначе, стационарного пуассоновского потока [Богдановф, 1989]. Этой же моделью, очевидно, описывается и накопление значений I_T или PGA_T . В рамках модели простейшего потока временные интервалы между последовательными сейсмическими событиями ΔT в любом фиксированном энергетическо-пространственно-временном интервале имеют экспоненциальное распределение, а вероятность P рассчитывается по формуле $P = 1 - \exp(-t/T)$ [Богдановф, 1989] или, используя приближение Тейлора, $P \approx t/T$.

Очевидно, что предположение о стационарности накопления землетрясений с отсутствием последействия в реальных условиях выполняется достаточно редко [Герман, 2005; 2010; и др.]. В [Герман, 2005; 2010] было показано, что даже для относительно сильных землетрясений указанные допущения не выполняются и распределение времен ΔT не соответствует экспоненциальному закону. В то же время оно удовлетворительно приближается его обобщением – распределением Вейбулла с функцией распределения $F_W(\Delta t) = 1 - \exp(-\lambda \Delta t^k)$ [Герман, 2005; 2010], где λ – масштабный параметр, а k – параметр формы. Если $k = 1$, распределение Вейбулла переходит в экспоненциальное.

Параметр формы k определяет функцию интенсивности отказов $r(\Delta t) = \lambda k \Delta t^{k-1}$ – плотность вероятности возникновения очередного события спустя временной промежуток Δt после возникновения последнего зарегистрированного. Таким образом, если $k < 1$, то наблюдается группировка землетрясений во времени (вероятность возникновения нового землетрясения после последнего зарегистрированного со временем уменьшается). Соответственно, значения k , большие 1, говорят о наличии «отталкивания» землетрясений.

В частности, в целом для Камчатского региона наблюдается выраженное группирование землетрясений. Для него характерно значение параметра k , равное 0.65 [Герман, 2005; 2010], но вдоль контакта Тихоокеанской и Охотских плит имеется протяженная область со значениями менее 0.5 [Герман, 2011].

Группирование во времени будет наблюдаться и для величин I_T или PGA_T . Их накопление будет описываться моделью процесса Вейбулла (нестационарным пуассоновским процессом), для которого вероятность $P = P_w$ должна рассчитываться по формуле $P_w = 1 - \exp(-(t/T_w)^k)$ [Богдановф, 1989, раздел 2.1]. Для обеспечения неизменности среднего периода повторяемости значений I_T или PGA_T параметр T_w должен подбираться таким образом, чтобы среднее значение для определяемого им распределения Вейбулла давало значение, равное T . Известно, что среднее значение повторяемости в случае распределения Вейбулла равно $T_w \Gamma(1 + 1/k)$, где Γ – гамма-функция [Богдановф, 1989]. Из равенства этого выражения T получаем, что $T_w = T / \Gamma(1 + 1/k)$. Соответственно, уточненная вероятность $P_w = 1 - \exp(- (t \Gamma(1 + 1/k) / T)^k)$. Так, при $k = 0.65$ $\Gamma(1 + 1/k) = 1.366$ в случае $t = 50$ лет и $T = 475 \approx 500$ лет, вероятность P повышается с 10% (в случае предположения о стационарном пуассоновском накоплении) до 25% (в случае распределения Вейбулла).

Таким образом, отсутствие учета группирования землетрясений во времени приводит к заниженным оценкам вероятности превышения значений I_T или PGA_T в течение времени t , а, следовательно, к существенному занижению оценок сейсмической опасности.

Литература

- Богдановф Дж., Козин Ф. Вероятностные модели накопления повреждений: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 344 с.
- Герман В.И. Самоподобие временной структуры сейсмических событий на разных масштабных уровнях // Вулканология и сейсмология. 2005. № 3. С. 66–74.
- Герман В.И. Единая теория подобия структуры сейсмичности: статистический подход. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2010. 80 с.
- Герман В.И. Выделение аномалий структуры сейсмичности и их связь с тектоническим строением территории // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы Второй молодежной школы-семинара. М.: ИФЗ, 2011. Т. 1. С. 62–64.

О ПОДХОДЕ К СИСТЕМАТИЧЕСКОМУ ПРОГНОЗУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Гитис В.Г., Дерендяев А.Б., Петров К.Н.

*Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН,
г. Москва, Россия*

E-mail: gitis@iitp.ru

(устный доклад)

Систематический прогноз землетрясений производится регулярно с шагом Δt в заранее выбранной зоне анализа. На каждом шаге с удаленных серверов дополняется выборка эпицентров целевых землетрясений и загружаются новые исходные данные о сейсмическом процессе. Данные обрабатываются, преобразуются в пространственные и пространственно-временные сеточные поля признаков прогноза, и производится машинное обучение по всем данным, имеющимся от начала обучения до момента прогноза t^* . В результате обучения вычисляется карта зоны тревоги, в которой на интервале $(t^*, t^* + \Delta t]$ ожидается эпицентр целевого землетрясения. На следующем шаге интервал обучения увеличивается на величину Δt .

Обучение базируется на методе минимальной области тревоги. Зона тревоги определяется функцией сеточных пространственно-временных полей признаков, вычисленных по исходным данным. Математическая модель метода позволяет выбирать в полях признаков предшествующие целевым землетрясениям аномалии, которые могут являться предвестниками землетрясений, сравнивать эти аномалии между собой и затем использовать аналогичные аномалии при прогнозе. Модель вводит ограничения на класс решающих правил прогноза. Это помогает до некоторой степени компенсировать малое количество сильных землетрясений, используемых для обучения.

В наших предыдущих работах качество прогноза определялось оценкой вероятности обнаружения целевых событий при заданной средней величине зоны тревоги. В докладе мы рассматриваем обобщение метода минимальной области тревоги, предназначенное для улучшения другой характеристики качества прогноза: вероятности появления хотя бы одного целевого события в ожидаемой зоне тревоги. При систематическом прогнозе оценка этой характеристики не превышает отношения числа целевых событий в зоне анализа к числу интервалов прогноза.

Изменение метода минимальной области тревоги состоит в том, что в момент прогноза t^* по данным обучения принимаются два решения. Первое решение определяет возможность появления эпицентра землетрясения с целевой магнитудой в зоне анализа на интервале прогноза $(t^*, t^* + \Delta t]$. Это решение не зависит от пространственного положения эпицентра ожидаемого землетрясения в зоне анализа и отображается как временной ряд

тревоги. Если принято решение *о прогнозе по времени*, состоящее в том, что на данном интервале работы системы прогноза целевое событие в зоне анализа возможно, то принимается второе решение *о прогнозе по пространству*: вычисляется карта с зоной тревоги площадью $s(t^*)$, в которой на интервале $(t^*, t^* + \Delta t]$ ожидается эпицентр целевого землетрясения. Целевое землетрясение предсказано, если его эпицентр попадает в вычисленную зону тревоги. Прогноз тем успешнее, чем больше произведение $s(t^*)\Delta t$. Вместе с тем очевидно, что при прогнозе величина этой пространственно-временной области должна быть разумно ограничена.

Моделирование прогноза выполнено для регионов Камчатки и Калифорнии. Исходные данные Камчатки состоят из каталога землетрясений КФ ФИЦ ЕГС РАН. *Целевыми событиями являются эпицентры землетрясений с магнитудами $m \geq 5.8$ и глубинами гипоцентров не более 60 км.* Для региона Калифорнии использовались данные каталога землетрясений NEIC и временные ряды суточных горизонтальных смещений поверхности земли по данным GPS, загруженные с сайта Nevada Geodetic Laboratory (NGL). *Целевыми событиями являются эпицентры землетрясений с магнитудами $m \geq 5.5$ и глубинами гипоцентров не более 60 км.*

Результаты моделирования показывают, что для зон тревоги, площадь которых в среднем составляет от 20% до 30% от площади зоны анализа, оценки вероятности обнаружения целевых событий составляют 0.7–0.8. При этом оценки вероятности того, что в прогнозируемой зоне тревоги ожидается появление эпицентра целевого землетрясения, принимают весьма малые значения порядка 0.15. В то же время для систематического прогноза эти оценки значительно превышают аналогичные оценки вероятности прогноза по случайным полям.

Мы полагаем, что для развития подхода к систематическому прогнозу землетрясений в направлении решения прикладных задач целесообразно проведение следующих исследований: (1) совершенствование методов систематического прогноза землетрясений во времени, (2) поиск новых сеточных полей, представляющих характеристики процессов подготовки очага сильного землетрясения, (3) развитие методов анализа дополнительных типов исходных данных.

Работа частично поддержана грантом РФФИ 20-07-00445. Авторы выражают благодарность Е.Н. Петровой и С.А. Пирогову за полезные замечания.

WEB-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ГИС «ACTIVETECTONICS» КАК БАНК ДАННЫХ ИНФОРМАЦИИ ПО АКТИВНОЙ ТЕКТОНИКЕ ЮГА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Гладков А.А.^{1,2}, Лунина О.В.¹

¹ ГАУ ДО ИО «Центр развития дополнительного образования детей»,
детский технопарк «Кванториум Байкал», г. Иркутск, Россия

² Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

E-mail: anton90ne@rambler.ru

(устный доклад)

Согласно современным представлениям, эпицентры сильных землетрясений ассоциируются с зонами активных разломов [Wells, 1994; Шерман, 2015]. Выделение и картирование активных разломов, сейсмогенных разрывов и зон возможных очагов землетрясений является важнейшим этапом работ по оценке и прогнозированию сейсмической опасности. Коллективом авторов настоящей работы разрабатывается и модернизируется web-ориентированная геоинформационная система «ActiveTectonics» (доступна в открытом доступе по адресу <http://activetectonics.ru>).

В состав ГИС входят базы данных активных разломов и сейсмогенных разрывов (в настоящее время подключена в тестовом режиме) и набор инструментов для их визуализации на карте, генерации детализированных отчетов, обновления и редактирования данных в режиме online. Базы данных содержат детальную информацию по многим изученным тектоническим структурам, включая параметрические данные, связанные изображения и фотографии, публикации, комментарии специалистов и мн. др., вся информация доступна любому заинтересованному пользователю. Доступ к модулю редактирования и добавления информации осуществляется только для зарегистрированных пользователей через систему аутентификации.

При разработке геоинформационной системы авторами учитывается опыт зарубежных и отечественных специалистов [Basili, 2008; Caputo, 2012; U.S.G.S., 2021; Lunina, 2014; Бачманов, 2017] и используется современный набор средств разработки web-ориентированных систем и геопространственных баз данных (YandexMaps API, JavaScript, PHP, GeoJSON и мн. др.).

Предлагаемый программный продукт может использоваться специалистами при проведении работ по оценке сейсмической опасности, для создания, обработки и комплексного анализа баз данных по активной тектонике различных регионов России, а при дальнейшем развитии – для моделирования распространения сейсмического эффекта и прогнозирования возможных последствий землетрясений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-45-385001 п_Наставник.

Литература

Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 711–736.

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. № 1. С. 1–34.

Basili R., Valensise G., Vannoli P., Burrato P., Fracassi U., Mariano S., Tiberti M., Boschi E. The Database of Individual Seismogenic Source (DISS), Version 3: Summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology // Tectonophysics. 2008. V. 453. P. 20–43.

Caputo R., Chatzipetros A., Pavlides S., Sboras S. The Greek Database of Seismogenic Sources (GreDaSS): state-of-the-art for northern Greece // Annals of Geophysics. 2012. V. 55. No. 5. P. 859–894.

Lunina O.V., Caputo R., Gladkov A., Gladkov AS. Southern East Siberia Pliocene-Quaternary faults: database, analysis and inference // Geoscience Frontiers. 2014. V. 5. P. 605–619.

U.S.G.S. (USA Geological Survey and supporting agency). Quaternary fault and fold database for the United States. From USGS web site. URL: <http://earthquakes.usgs.gov/regional/qfaults/>. – Last accessed 10 July 2021.

Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationship among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1994. V. 84. No. 4. P. 974–1002.

СЕЙСМООПАСНЫЕ (M6+) УЗЛЫ БОЛГАРСКОГО РЕГИОНА

Горшков А.И.¹, Новикова О.В.¹, Димитрова С.², Димова Л.³, Райкова Р.³

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

² *Национальный институт геофизики, геологии и географии, г. София,
Болгария*

³ *Физический факультет Софийского университета им. Климента
Охридского, г. София, Болгария*

E-mail: gorshkov@mitp.ru

(устный доклад)

В 70-х годах прошлого века академиком В.И. Кейлис-Бороком были заложены основы методологии, позволяющей идентифицировать места возможного возникновения сильных землетрясений с помощью алгоритмов распознавания образов [Gelfand, 1972]. Методология основывается на гипотезе о связи эпицентров сильных землетрясений с морфоструктурными узлами, которые формируются в местах пересечения морфоструктурных линеаментов, ограничивающих морфологически однородные блоки земной коры. Положение узлов на местности определяется с помощью специализированного морфоструктурного районирования (МСР) [Раицман, 1979]. Многолетние исследования сейсмоактивных регионов мира показали достаточно высокую надежность методологии для определения потенциально сейсмоопасных узлов [Соловьев, 2014; Gorshkov, 2018].

Задача определения сейсмогенных узлов для M6+ решена на основе схемы МСР Болгарского региона, отображающей положение узлов в линеаментно-блоковой структуре изучаемой территории. Определено 178 узлов, которые составили множество объектов для задачи распознавания.

На территории Болгарского региона по данным каталогов [Grigorova, 1978; Solakov, 2020] за период с I до конца XX веков известно 30 землетрясений с M6+. Эпицентры этих землетрясений приурочены к 16 узлам, которые составили материал обучения высокосейсмичного класса для алгоритма распознавания Кора-3 [Gelfand, 1972]. Классификация узлов на высоко- и низкосейсмичные относительно порога $M = 6.0$ получена на основе морфометрических, геологических, гравитационных и магнитных параметров, а также параметров, характеризующих геометрию линеаментно-блоковой структуры Болгарского региона, установленную в результате МСР.

В результате распознавания из 178 узлов региона к сейсмоопасным для M6+ отнесено 59 узлов, включая 15, входивших в материал обучения. Большинство распознанных сейсмоопасных узлов расположено на линеаментах высших (первого и второго) рангов, которые разделяют наиболее крупные блоки земной коры. Большая часть сейсмоопасных узлов расположена в горных областях региона: массивах Рила и Родопы, а также в горном

хребте Стара Планина. Сейсмоопасные узлы характеризуются «большими» значениями размаха высот и градиента рельефа в сочетании с «большими» значениями градиентов гравитационных и магнитных аномалий. Совокупность установленных распознаванием характерных признаков сейсмогенных узлов для М6+ указывает на высокую контрастность неотектонических движений земной коры и наличие в ней глубинных неоднородностей [Йосифов, 2020] в окрестностях таких узлов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 20-55-18008.

Литература

- Йосифов Д., Радичев Р., Райкова Р. Геофизика на литосферата и нелинейна металогеология на България. София: МГУ «Св. Иван Рилски», 2020. 278 с.
- Соловьев А.А., Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Добровольский М.Н., Новикова О.В. Распознавание мест возможного возникновения землетрясений: методология и анализ результатов // Известия РАН, сер. Физика Земли. 2014. № 2. С. 161–178.
- Gelfand I.M., Guberman Sh., Izvekova M.L., Keilis-Borok V.I., Ranzman E.Ja. Criteria of high seismicity determined by pattern recognition // Tectonophysics. 1972. V. 13. P. 415–422. DOI: 10.1016/B978-0-444-41015-3.50028-8
- Gorshkov A., Novikova O. Estimating the validity of the recognition results of earthquake prone areas using the ArcMap // Acta Geophysica. 2018. V. 66. № 5. P. 843–853. DOI:10.1007/s11600-018-0177
- Grigorova E., Christoskov L., Sokerova D., Rizhikova S., Roglinov A. Catalogue of earthquakes in Bulgaria and the nearby territories during the period 1st cent. BC - 1977. Archives Bulletin of the Institute of Geophysics. Bulg. Acad. Sci., Sofia, 1978.
- Solakov D., Simeonova S., Raykova Pl., Aleksandrova I. Catalogue of the earthquakes in Bulgaria and surroundings since 1981. National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography-Bulgarian Academy of Sciences. 2020. DOI:10.34975/ctlg-2020.v.1

ЭЛЬБРУССКАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПРЕЦИЗИОННЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ: В ПОГОНЕ ЗА 0.0001 ГРАДУСА

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: vyg@ifz.ru

(стендовый доклад)

Знание количественной информации о потоке тепла из недр Земли является основополагающей для более глубокого понимания взаимосвязи флюидно-магматических и геодинамических процессов. Однако, к сожалению, сегодня для прямых измерений глубинных температур доступны лишь первые километры земной коры. Размещение разработанной нами прецизионной температурной системы измерений [Лиходеев, 2018; 2019] в непосредственной близости от вулкана Эльбрус позволяет получать уникальные данные о структуре и динамике теплового поля в его окрестности. Исследование этого вулкана является особо важной задачей как с точки зрения получения новых фундаментальных знаний о строении магматических структур, так и с точки зрения оценки вулканической опасности, обусловленной наличием жидкого магматического расплава в недрах вулкана, что, в свою очередь, позволит получить новые данные о потенциальной опасности Эльбрусского вулканического центра. Оценка вкладов в тепловой поток кондуктивной и конвективных составляющих позволяет сделать выводы о динамике флюидо-магматической системы Эльбрусского вулканического центра и исследовать режим его функционирования, а также может использоваться непосредственно для мониторинга вулканической опасности.

Система прецизионных температурных измерений была установлена в 2018 году в Северокавказской геофизической обсерватории № 2 ИФЗ РАН [Собисевич, 2013], располагающейся в массиве горы Андырчи, на удалении от входа в штольню порядка 4 км и на глубине 2 км от поверхности. Такое уникальное местоположение лаборатории позволяет проводить высокоточный мониторинг различных геофизических полей, включая температурные, в условиях почти полного отсутствия помех. В данных условиях, пытаюсь достичь все большего разрешения по температуре, на первое место выходят технические и технологические проблемы, требующие нетривиальных подходов. Благодаря использованию нестандартных схемотехнических решений, находящихся в данный момент в фазе патентования, удалось существенно уменьшить на полученных записях температуры уровень наведенных шумов. Это позволило шаг за шагом увеличивать относительную разрешающую способность системы с 0.01°C в начале работ до 0.003°C. В этом году нами в рамках

дальнейшего совершенствования системы мониторинга была существенно улучшена вся система электропитания. За счет предпринятых мер нам впервые удалось подойти вплотную к уровню разрешения по температуре 0.0001°C .

Благодаря достигнутому высокому разрешению разработанной системы прецизионных температурных наблюдений удастся устойчиво выделять вариации температуры горных пород с амплитудами $0.005\text{--}0.02^{\circ}\text{C}$. Подобные кратковременные вариации температуры могут быть обусловлены конвективной составляющей теплового потока, связанной с изменением скорости миграции флюидов. Часть вариаций имеют ярко выраженный периодический характер, что подтверждается спектральным анализом, причем амплитуды суточных колебаний изменяются во времени, возможно, данное явление является сезонным. В ходе проведенных работ было проведено сопоставление микровариаций температуры с концентрацией аэрозолей по данным лидарного мониторинга (от англ. LiDAR – Light Detecting And Ranging) – прибора, действующего по принципу радара, с тем отличием, что вместо радиоволн используется излучение лазеров оптического диапазона [Першин, 2018]. Было отмечено совпадение по времени наблюдаемых температурных аномалий и повышения концентрации аэрозолей, что позволяет сделать предварительный вывод о том, что подобные температурные аномалии несомненно напрямую связаны с периодическими вариациями выноса флюидов в окрестностях места наблюдения [Pershin, 2020].

Важность и актуальность подобных исследований определяются современными тенденциями активного экономического освоения горных территорий Северного Кавказа, в частности Приэльбрусья с учётом его рекреационного потенциала, и общей стратегической значимостью южных регионов России. Дальнейшее развитие представленных прецизионных температурных наблюдений в различных районах России и в первую очередь в Эльбрусской вулканической области, Пятигорском вулканическом центре и Крымско-Таманской грязевулканической провинции позволит с высокой точностью определить потенциалы извлечения энергии из соответствующих тепловых резервуаров и, таким образом, будет иметь важное значение для экономической энергобезопасности России.

Литература

- 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. 15–25. DOI:10.21455/std2018.1-2.
- 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. DOI:10.18358/NP-29-1-I1116.

- Першин С.М., Долгих Г.И., Бункин А.Ф., Гришин М.Я., Завозин В.А., Клинков В.К., Леднёв В.Н., Макаров В.С., Плотников А.А., Тюрин А.В.* Корреляции сигналов лидарного аэрозольного рассеяния и лазерного деформографа при сжатии/растяжении коры Земли // Краткие сообщения по физике Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук. 2018. Т. 45. № 7. С. 32–38.
- Собисевич А.Л.* Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. Т. 2. Северокавказская геофизическая обсерватория. Создание, анализ результатов наблюдений. М.: ИФЗ РАН, 2013. 512 с.
- Pershin S.M., Sobisevich A.L., Grishin M.Y., Gravirov V.V., Zavozin V.A., Kuzminov V.V., Lednev V.N., Likhodeev D.V., Makarov V.S., Myasnikov A.V., and Fedorov A.N.* Volcanic activity monitoring by unique lidar based on a diode laser // Laser Physics Letters. 2020. V. 17. № 11. P. 115607–115613. DOI:10.1088/1612-202x/abbedc

СЕЙСМОКРИОДИНАМИКА БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА И ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕРЗЛОТНЫХ УСЛОВИЙ НА СЕЙМИЧЕСКУЮ ОПАСНОСТЬ ПРИ ДЕГРАДАЦИИ МЕРЗЛОТЫ

Джурик В.И., Брыжак Е.В., Серебренников С.П.

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

E-mail: dzhurik@crust.irk.ru

(устный доклад)

Динамика сейсмической опасности мерзлых грунтов связана с изменением природных и техногенных факторов. Природные факторы обязаны вариациям климатических условий всей земли или отдельных ее территорий, а техногенные – влиянию производственного освоения территорий [Гречищев, 1980].

Байкальский регион отличается значительными вариациями: как потенциальной сейсмической опасностью, так и температурным полем грунтов, от положительных температур на юге и юго-западе до -5°C на северо-востоке. Проведенный нами анализ распределения уровня сейсмичности [ОСР-2015] и распространения мерзлоты [Геокриологическая карта..., 1996] на территории Байкальского региона показывает, что границы этих зон практически не согласуются. Для всего региона характерны значительные изменения как потенциальной сейсмической опасности, так и температурного поля грунтов. Но сами вариации проявления сейсмичности для территорий, расположенных в различных сейсмоклиматических зонах, при одинаковых сейсмических воздействиях будут меняться во времени в соответствии с изменением физических, упругих и прочностных свойств мерзлоты при ее оттаивании [Джурик, 2020].

В нашем понимании сейсмокриодинамика рассматривает закономерности проявления сейсмичности в пределах криолитозоны как результат изменения характера сейсмических колебаний при сильных землетрясениях слоев мерзлых грунтов, обязанных изменению их температуры, под воздействием климата и техногенеза на различных масштабных уровнях. От локальных площадок отдельных ответственных сооружений до региональных, с учетом сейсмоклиматических зон региона [Джурик, 2021].

Учитывая сказанное, работы были направлены на решение конкретной задачи – прогнозу сейсмических воздействий с учетом основных закономерностей сейсмокриодинамики, направленных на учет расположенных на исследуемой территории особых инженерно-сейсмогеокриологических областей [Солоненко, 1977], на которых вечная мерзлота существенно усложняет оценку и районирование максимальных прогнозных сейсмических воздействий.

При проведении исследований для решения задач динамики мерзлых грунтов при землетрясениях использовались основные характеристики сейсмических сигналов (акселерограммы, спектры и частотные характеристики грунтовых слоев) и их параметры (частота, амплитуда и продолжительность сейсмического воздействия). Поведение грунтов при этом определяется не только приповерхностными геологическими условиями, но и наиболее глубокими неоднородностями среды. Поскольку изменяется и характер взаимодействия данного слоя, находящегося в новом состоянии, с подходящими поверхностными волнами и сейсмическим сигналом из полупространства.

В докладе на основе комплексного подхода к изучению сейсмокриодинамики обобщаются ранее полученные данные и рассматривается связь параметров температурных и геофизических полей с годовыми вариациями спектрального состава колебаний поверхности грунтов при землетрясениях. Результаты исследований, по многолетним данным, представляются на примере спектрального анализа записей землетрясений, зарегистрированных в различных сейсмоклиматических зонах региона. В рассмотрение включается влияние наиболее динамичной зоны, обязанной экзогенным процессам, происходящим, в свою очередь, в области влияния годовых вариаций температур. Предлагается методика прогноза поведения мерзлых грунтов при сейсмических воздействиях на случай их перехода в талое состояние на примере крупных геологических структур Байкальской сейсмической зоны – Муйской и Чарской впадин.

Литература

- Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. М.: Недра, 1980. 380 с.
- Геокриологическая карта СССР (под ред. А.Ю. Рогатюк): Масштаб 1:2500000, Лист 11, МГУ им. М.В. Ломоносова, 1996.
- Джурик В.И., Брыжак Е.В., Серебренников С.П., Ескин А.Ю. Динамика спектрального состава колебаний приповерхностного слоя годовых вариаций температур при землетрясениях в Байкальском регионе // Геология и геофизика. 2020. № 8. С. 1136–1146.
- Джурик В.И., Брыжак Е.В., Батсайхан Ц., Серебренников С.П., Ескин А.Ю. Сейсмокриодинамика Байкало-Монгольского региона и прогноз сейсмических воздействий сильных землетрясений при деградации мерзлоты // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: Тез. докл. VIII Междунар. симпозиума (Бишкек, 28 июня - 2 июля 2021 г.). Бишкек: НС РАН, 2021. С. 274–276.
- ОСР-2015. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации «Строительство в сейсмических районах» (СП 14.13330.2011).
- Солоненко В.П. Особенности сейсмических проявлений в условиях вечной мерзлоты // Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы. Новосибирск: Наука, 1977. С. 279–284.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ АНАЛИТИЧНОСТЬ И ГЛОБАЛЬНЫЕ АПРИОРНЫЕ ОЦЕНКИ СОБОЛЕВСКИХ НОРМ РЕШЕНИЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ДИФфуЗИОННОЙ МАГНИТОГИДРОДИНАМИКИ И ИХ ПРОИЗВОДНЫХ ПО ВРЕМЕНИ

Желиговский В.А.

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

E-mail: vlad@mitp.ru

(устный доклад)

Актуальная задача аналитического исследования турбулентности – вывод эмпирических соотношений, характеризующих это явление, из основополагающих уравнений гидродинамики. Неизвестны ответы и на родственные математические вопросы: каков класс функций, в котором гарантированы существование и единственность решений, могут ли в решениях развиваться сингулярности за конечное время? Прогресс в решении этих задач невозможен без глубокого понимания поведения короткомасштабных структур в течениях. Возможный подход к его изучению состоит в получении информации о нормах производных решений высокого порядка: чем порядок выше, тем сильнее соответствующая норма контролируется короткомасштабными компонентами решения.

Фояш, Гийопе и Темам [Foias, 1981] доказали априорные оценки для производных произвольных порядков по пространственным переменным решений уравнения Навье – Стокса. В работе [Zheligovsky, 2021] применен оригинальный метод для вывода аналогичных оценок пространственных производных трехмерных пространственно-периодических решений эволюционных уравнений диффузионной магнитогидродинамики:

$$\int_{t_0}^T (\|\mathbf{V}\|_s^2 + \|\mathbf{B}\|_s^2)^{\alpha_s/2} dx < \infty \text{ при } s \geq 1 \text{ и любых } T \text{ таких, что } t_0 < T < \infty.$$

Доказательство опирается на пространственную аналитичность решений при почти всех временах. Определена вспомогательная задача, соболевская норма пространства $H^{3/2}$ ее решений ограничивает снизу размер области пространственной аналитичности в C^3 решений исходной задачи. Те же показатели $\alpha_s = 2/(2s-1)$, что и найденные в работе [Foias, 1981] для норм пространства H^s течений в гидродинамической задаче, возникают в рассматриваемой МГД задаче (вследствие сходства квадратичных нелинейных членов в уравнении Навье – Стокса и в уравнении магнитной индукции).

Этот же подход использован для вывода априорных оценок пространственных производных произвольного порядка первой производной МГД решений по времени:

$$\int_{t_0}^T (\|d\mathbf{V}/dt\|_s^2 + \|d\mathbf{B}/dt\|_s^2)^{\alpha_{s+2}/2} dx < \infty \text{ при } s \geq -1/2 \text{ и любых } T \text{ таких, что } t_0 < T < \infty.$$

Также выведены оценки решений в нормах соболевских пространств для других величин индекса s и в нормах алгебры Винера при различных s .

Доказано, что слабые решения, построенные как пределы приближений Фурье – Галеркина, удовлетворяют этим оценкам. Для этого изучено множество времён (предполагаемых) сингулярностей слабых решений и показано, что приближения равномерно сходятся в норме H^1 на любом закрытом интервале внутри дополнения к этому множеству.

Литература

- Foias C., Guillopé C., Temam R.* New a priori estimates for Navier-Stokes equations in dimension 3 // *Comm. Partial Diff. Equations*. 1981. V. 6. P. 329–359.
- Zheligovsky V.* Space analyticity and bounds for derivatives of solutions to the evolutionary equations of diffusive magnetohydrodynamics // *Mathematics*. 2021. V. 9. Article 1789. DOI:10.3390/math9151789

АЛГОРИТМ КОЗ – 35 ЛЕТ ТЕСТИРОВАНИЯ И ПОСЛЕДНИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Завьялов А.Д.

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

E-mail: zavyalov@ifz.ru

(устный доклад)

В середине 1980-х годов в Институте физики Земли АН СССР возникла неформальная творческая группа во главе с Г.А. Соболевым. Она получила название «Группа оперативного сравнительного анализа сейсмичности» (группа ОСАС). Этот коллектив не имел жестко определенного состава. В разное время в нее входили:

от ИФЗ РАН: *Геннадий А. Соболев, Лидия Б. Славина, Алексей Д. Завьялов, Елизавета Н. Седова, Евгений А. Рогожин, Андрей А. Никонов, Тимур Т. Тагизаде;*

от ИГ Грузии: *Тамаз Л. Челидзе, Тамаз Пилишвили, Русико Хелашвили, Вано Е. Николадзе, Лали Кахиани, Лали Лабадзе, Юрий М. Колесников.*

Перед группой стояла задача – разработка методики построения карты мест наиболее вероятного возникновения сильных землетрясений с использованием пространственно-временных распределений различных геолого-геофизических данных. В результате нескольких лет работы на свет появился алгоритм, получивший впоследствии название Карта Ожидаемых Землетрясений (*Map of Expected Earthquakes*) – КОЗ.

Под алгоритмом прогноза землетрясений будем понимать последовательность действий, направленных на выделение характерных признаков или аномальных изменений в различных геолого-геофизических полях, их совместное рассмотрение и анализ с целью определения места, силы и времени возникновения землетрясения [Завьялов, 2006].

В основе алгоритма КОЗ лежат представления о процессе разрушения геологической среды как самоподобной и самоорганизованной системы разномасштабных блоков горных пород. Основываясь на кинетической концепции прочности твердых тел, удалось составить образы аномального поведения различных сейсмологических параметров (предвестников) перед сильными ($M \geq 5.5$) землетрясениями. Алгоритм КОЗ использует принцип пространственно-временного сканирования каталога землетрясений в пределах исследуемого сейсмоактивного региона. Используя байесовский подход, рассчитываются карты распределения условной вероятности $P(D_1|K)$ возникновения сильного землетрясения в каждой пространственно-временной ячейке [Завьялов, 2006].

Совокупность значений условной вероятности $P(D_1|K)$ для всех пространственных ячеек сетки получила название Карты Ожидаемых Землетрясений на период времени $[t_0, t_0 + \Delta T_{КОЗ}]$, где $\Delta T_{КОЗ}$ – время действия КОЗ. Предполагается, что возникновение сильного землетрясения в этом временном интервале равновероятно. Однако здесь уместно

упомянуть работу М.О. Куценко, А.Д. Завьялова [Куценко, 2011], в которой показано, что возникновение землетрясений в разные годовые интервалы времени ожидания не равновероятно. Оказалось, что возникновение сильных землетрясений наиболее вероятно в первые годы после появления предвестника. Практически для всех предвестников вероятность возникновения сильных событий в первый год составила 25%, а в первые 5 лет – более 70%. Отметим, что эта работа была выполнена на материале каталогов тектонических землетрясений из разных сейсмоактивных регионов мира.

За прошедшие 35 лет алгоритм был протестирован в различных сейсмоактивных регионах мира: Кавказ, Камчатка, Копет-Даг, Киргизия, Южная Калифорния, Северо-Восточный и Юго-Западный Китай, Греция, Западная Турция, Курильские о-ва, Новая Зеландия. Средняя прогностическая эффективность по этим регионам составила $J_{КОЗ} = 2.56$ и 3.82 при выборе в качестве уровня тревоги величины условной вероятности $P(D_1|K) = 70\%$ и 90% соответственно. При этом в зонах с этими уровнями условной вероятности произошло 68% и 41% прогнозируемых землетрясений (магнитуды $M \geq 5.5$), а площадь зон тревоги составила 30% и 14% от общей площади наблюдений.

В последней работе впервые предпринята попытка использовать алгоритм среднесрочного прогноза землетрясений КОЗ для построения карт ожидаемых землетрясений (магнитуды $M \geq 4.0$) в классическом районе с переходным режимом сейсмичности – район водохранилищ Койна-Варна, Индия. Полученные впервые результаты применения алгоритма КОЗ в этом районе оказались обнадеживающими. Они показали его достаточно высокую прогнозную эффективность, оказавшуюся равной $J_{КОЗ} = 2.76$. В зонах с уровнем условной вероятности $P(D_1|K) \geq 90\%$ произошло 56.3% всех землетрясений $M_L \geq 4.0$. При этом площадь тревог составила $20.4 \pm 8.4\%$ от общей площади наблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания ИФЗ РАН № 0144-2019-0010.

Литература

- Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. 254 с.
- Куценко М.О., Завьялов А.Д. Вероятность землетрясения на интервале времени ожидания по комплексу прогностических признаков // Материалы 12-ой Уральской молодежной научной школы по геофизике. Пермь, 21–25 марта 2011 г. С. 131–136.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА ЛАВОВЫХ КУПОЛОВ НА ПРИМЕРЕ ВУЛКАНА КОЛИМА В МЕКСИКЕ

Зейналова Н.Р.^{1,2}, Исмаил-Заде А.Т.^{1,2}, Мельник О.Э.³, Цепелев И.А.⁴, Зобин В.М.⁵

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

² *Технологический институт Карлсруэ, Институт прикладных наук о Земле,
г. Карлсруэ, Германия*

³ *Научно-исследовательский институт механики МГУ имени М.В.
Ломоносова, г. Москва, Россия*

⁴ *Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН,
г. Екатеринбург, Россия*

⁵ *Центр вулканологических исследований, Университет де Колима, г. Колима,
Мексика*

E-mail: natalya.zeinalova@kit.edu

(устный доклад)

Извержение магмы, эволюция лавовых куполов, обрушение куполов и связанные с этим опасности возникновения пирокластических потоков относятся к числу важных вулканологических исследований. В данном докладе представляется исследование влияния реологических свойств лавовых куполов на их морфологию путем проведения численного моделирования их роста. Была изучена эволюция купола на вулкане Колима в Мексике в течение почти трех лет, с февраля 2007 г. по октябрь 2009 г. Для сравнения модельного и наблюдаемого лавовых куполов использовались фотоизображения, снятые на камеру в течение всего периода роста купола. Реология лавы включает кинетику роста кристаллов и зависит от характерного времени роста содержания кристаллов (или времени релаксации) и характерного коэффициента вязкости лавы, определяющего порядок вязкости. Первоначально был проведен анализ влияния фактора вязкости, времени релаксации и расхода лавы на морфологию роста купола. Далее были рассмотрены несколько модельных сценариев роста лавового купола в зависимости от геометрии кратера, расположения канала вулкана, размера жерла вулкана и расхода лавы. Данные параметры подбирались либо эмпирическим путем (оптимизация наилучшего соответствия морфологической формы моделируемых куполов и наблюдаемого купола), либо по рассчитанным объемам лавового купола. В случае эмпирически полученных скоростей экструзии максимальная высота моделируемого лавового купола и его горизонтальная протяженность хорошо согласуются с наблюдениями. Лавовый купол по достижении максимальной высоты начинает горизонтально растекаться вследствие существенного влияния гравитационных сил. Максимальная вязкость лавового купола, полученная в моделях ($\sim 10^{12}$ Па с), выше вязкости лавы, оцененной в лабораторных условиях по образцам местных лав. Различие в вязкостях может быть связано с тем фактом, что во время эволюции лавового купола происходит дегазация магмы, которая существенно влияет на ее вязкость.

Данная работа поддержана грантом РФФИ №19-17-00027.

СИСТЕМА РАЗЛОМОВ В ЗОНЕ ОТЛИВА ВДОЛЬ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ ТУРЬЕГО ПОЛУОСТРОВА (КАНДАЛАКШСКИЙ ЗАЛИВ, БЕЛОЕ МОРЕ) КАК ПРИЗНАК СОВРЕМЕННОЙ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

Ильченко В.Л.

Геологический институт Кольского НЦ РАН, г. Апатиты, Россия

E-mail: yadim@geoksc.apatity.ru

(устный доклад)

Большинство очагов землетрясений приурочено к разломам, маркирующим границы блоков земной коры различной иерархии, причём очаги наиболее сильных событий обычно привязаны к пересечениям границ этих блоков [Рогожин, 2000]. В дизъюнктивной тектонике ведущая (рельефообразующая) роль принадлежит зонам глубинных разломов. На Кольском полуострове геоморфологическим анализом земной поверхности выделяется ≥ 37 главных глубинных разломов [Козлов, 1979].

Геологическая изученность дна акватории Белого моря до последнего времени была довольно слабой, и только в последние годы здесь выполнены комплексные геофизические исследования [Шаров, 2019] с выявлением системы главных разломов, которые в основном ориентированы в северо-западном (Кандалакшско-Онежский) и северо-восточном (Зимнегорский) направлениях. Считается, что заложение Кандалакшско-Онежской системы произошло в обстановке растяжения в конце раннего протерозоя [Моралев, 2002].

Турый полуостров находится на северном берегу Кандалакшского залива Белого моря. Геологическая структура Кандалакшского залива – грабен, который отличается современной сейсмичностью (в Кандалакшской сейсмогенной зоне выделено > 15 объектов повышенной сейсмичности [Евзеров, 2016], которая обусловлена гляциоэвстатическими движениями северо-восточной части Балтийского щита [Колька, 2005]). На Турьем же полуострове [Горбунов, 1981] установлены разломы субширотного, субмеридионального и северо-западного (в меньшей степени) направлений (результаты геоморфологического анализа).

Летом 2021 года (конец июля – начало августа) на Турьем полуострове проведены полевые исследования с целью доизучения местных карбонатитовых интрузий. Кроме того, поскольку этого было трудно не заметить, были проведены геоморфологические наблюдения земной поверхности вдоль береговой полосы (в зоне отлива) на участке Кужручей – Хямручей (юго-западный берег Турьего полуострова). Высота прилива здесь достигает ≈ 2 м. Ширина приливно-отливной зоны варьирует по латерали от первых метров до ≈ 100 и более метров. На вдольбереговой полосе морского дна, во время отлива, выделяются прямолинейные контрастные образования («гряды» или полосы) шириной 5–7 м и высотой 0.5–1 м из грубообломочного (в основном – не окатанного) материала (отдельные глыбы

имеют размер 1.5–2 м), в плане образующие «сетку» ромбоподобных фигур с длиной стороны ≈ 100 м. Эти «гряды» ориентированы в широтном ($\approx 270^\circ$) и северо-западном ($\approx 320^\circ$ – 325°) направлениях. Поверхность морского дна внутри «ячеек», образованных пересечениями «гряд», выполнена преимущественно окатанным валунно-галечным и песчаным материалом. Продолжения «гряд» на суше проследить не удалось, поскольку почти сразу от береговой кромки (чья плавные очертания совершенно не совпадают по конфигурации с «грядовыми») пляжевые отложения сменяются моренными, вдобавок заросшими густым еловым лесом.

Приведенная (в предыдущем абзаце) информация позволяет сделать предположение о современной сейсмоструктурной активности разломов северо-западного и субширотного направлений в прибрежной зоне Турьего полуострова и в Кандалакшском грабене в целом. Ни для кого не секрет, что в приливно-отливных зонах очень удобно работать во многих отношениях (геологическое картирование, отбор образцов, геохронологических проб и т.п.), главным образом благодаря хорошей обнаженности местных коренных пород. Публикаций, где бы говорилось об использовании зон отлива для сейсмоструктурных наблюдений, существует не так много (по крайней мере, автору таковые не известны) и, значит, эту работу можно рассматривать как некоторым образом пионерскую.

Исследование проведено в рамках темы НИР ГИ КНЦ РАН № 0226-2019-0052.

Литература

- Горбунов Г.И., Бельков И.В., Макиевский С.И. и др.* Минеральные месторождения Кольского полуострова. Л.: «Наука», 1981. С. 83–87.
- Козлов М.Т.* Разрывная тектоника северо-восточной части Балтийского щита. Л.: Наука, 1979. 140 с.
- Колька В., Евзеров В., Мёллер Я., Корнер Д.* Послеледниковые гляциоизостатические движения на северо-востоке Балтийского щита // Новые данные по геологии и полезным ископаемым Кольского полуострова / Редактор академик РАН Ф.П. Митрофанов. Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН, 2005. С. 15–25.
- Моралев В.М., Балухев А.С., Терехов Е.Н.* Геодинамика главных этапов эволюции внутриплатформенной рифтовой системы Белого моря / Глубинное строение и геодинамика Фенноскандии, окраинных и внутриплатформенных транзитных зон. Материалы 8-й международной конференции. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2002. С. 168–169.
- 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>
- Шаров Н.В., Журавлев В.А.* Строение земной коры Белого моря и прилегающих территорий. // Арктика: экология и экономика. 2019. № 3 (35).

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ КРИПЕКС-ПАРАМЕТРА В ГЛУБИННЫХ СЕЙСМОФОКАЛЬНЫХ ЗОНАХ

Калинников И.И.¹, Михеева А.В.²

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

² Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

E-mail: anna@omzg.sccc.ru

(устный доклад)

Вместо канонического представления крипекса [Kaverina, 1996] в подсистеме анализа программной системы GIS-ENDDB предложена и реализована нормированная оценка этого параметра в модификации CrN_{cat} – результата приведения CrN каждого события к средним по исследуемому каталогу (в данной работе это каталог ISC: www.isc.ac.uk) значениям крипекса, рассчитываемым по полигональному тренду $CrN(M_S)$ всех событий каталога [Mikheeva, 2021]. Рассмотрим примеры сейсмогеодинамического исследования глубинной сейсмичности на основе полученного параметра CrN_{cat} .

В распределении $CrN(M_S)$ событий с глубиной $H \geq 100$ км каталога ISC (со ссылкой на IDC) в области Памиро-Гиндукушской сейсмофокальной зоны обращает на себя внимание разветвление графика, которое, видимо, характеризует наличие двух различных процессов, вызывающих глубинные землетрясения. Аналогичное разветвление прослеживается и на графике зависимости $CrN(mB)$ по данным каталога CSN (data.earthquake.cn/gcywfl). Поскольку полигональный тренд этой зависимости должен использоваться для нахождения CrN_{cat} , а исследуемое нами наиболее крупное землетрясение в ПГЗ (26.10.2015, $M_S = 7.5$) лежит на нижней ветви графика, из всего множества были выделены события 2000–2018 гг. нижней ветви для построения ее отдельного тренда. Показана большая редкость глубинных событий выделенного множества (от 1 до 43 месяцев) и знакопеременное поведение их крипекса, асинхронное изменению магнитуды $M_S(t)$ и глубины $H(t)$. Графики $M_S(t)$ и $H(t)$ также асинхронны друг другу, кроме интервала от 26 месяцев до события 26.10.2015 до 28 месяцев после события. Синхронное изменение магнитуды и глубины в период подготовки и релаксации очага свидетельствует о переходе среды в некоторое организованное состояние, характеризующееся переключкой более мелкофокусных и слабых с более глубокими и сильными землетрясениями. При этом $CrN_{cat}(t)$ становится синхронным с $M_S(t)$ и $H(t)$ за 11 суток до главного толчка 26.10.2015, характеризуя на протяжении следующих 29 месяцев отрицательным крипексом большую хрупкость именно мелкофокусных и слабых событий.

Данные китайского каталога CSN по Азиатскому региону достаточно полны для достоверной оценки крипекса сильных событий, поэтому с погрешностью 18% значение крипекса крупнейшего и наиболее глубокого события этого каталога: 24.05.2013, $M_S = 8$

($H = 640$ км), произошедшего в Охотском регионе, однозначно имеет существенное отрицательное значение: $CrN_{cat} = -0.138$. Можно предположить, что отрицательный крипекс характеризует именно глубинные сильные толчки. Действительно, для десятков рассмотренных коровых событий (ISC и ВJI: www.isc.ac.uk/cgi-bin/agency-get?agency=ВJI) характерно близкое к нулю или положительное значение крипекса со знакопеременным его поведением сразу после главного толчка. Это явление можно объяснить влиянием делатансии – разрушения пород отдельных хрупких парциальностей в очаге и перевода их в мелкодисперсное (сыпучее) состояние с высоким поглощением высокочастотных сейсмических волн, в результате чего сейсмическое излучение по выходе из очага оказывается обеднённым высокочастотной составляющей, т.е. завышает крипекс. Если бы вклад квазипластического движения в механизм главного толчка обеспечивался термодинамическим воздействием (например, «деформационного разогрева»), то для глубинных событий оно, очевидно, проявлялось бы в большей степени. Поэтому на примере события 24.05.2013 можно предположить, что на больших глубинах геофизическая среда благодаря влиянию более активной флюидизации, давлений и температур мгновенно залечивается, восстанавливая монолитное состояние горной породы даже после крупной дислокации. В течение 0.3 суток после землетрясения в очаге могли возникнуть дополнительные внутренние напряжения, вызвавшие ещё более «жесткое» афтершоковое разрушение (с ещё меньшим значением крипекса), после чего среда вернулась в исходное, также монолитное, состояние. Затем, в отличие от знакопеременного поведения крипекса коровых землетрясений, у глубинного события 24.05.2013 положительный рост крипекса происходит более гладко и на более растянутом временном интервале (18.2–292.6 суток после главного толчка), что можно связать с более протяженным термодинамическим влиянием на геофизическую среду первых сильных толчков, нарастающим до момента поступления нового охлажденного вещества из верхних слоев литосферы.

Приведенные результаты показывают высокую информативность предлагаемого подхода, обеспеченного развитой базой данных программы GIS-ENDDB.

Исследования выполнены в рамках государственного задания 0251-2021-0004.

Литература

- Kaverina A.N., Lander A.V., Prozorov A.G.* Global Creepex Distribution and Its Relation to Earthquake-Source Geometry and Tectonic Origin // *Geophysical Journal International*. 1996. V. 125. № 1. P. 249–265.
- Mikheeva A.V., Kalinnikov I.I.* Creepex as a Parameter of Seismo-Geodynamic Studies Based on Geo-Information Systems // *Мат. Всеросс. Конф. «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов»*, 24-27 августа 2021.

КОРОВАЯ ПОГОДА И СИЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ. ДЕФИЦИТ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ ПО ГНСС НАБЛЮДЕНИЯМ

Кафтан В.И.

Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия

E-mail: v.kaftan@gcras.ru

(устный доклад)

В земной коре на глубинах в десятки километров концентрируются гипоцентры сильных коровых землетрясений, очаги (сейсморазрывы) которых выходят на дневную поверхность. По устоявшимся представлениям, подготовка землетрясения, равно как само событие и последующая релаксация напряжений являются деформационными процессами. Косейсмические движения и деформации земной поверхности хорошо изучены, и для разрушительных коровых землетрясений с $M > 5.9$ смещения на земной поверхности имеют величины от первых дециметров до сотен метров, а деформации превышают 10^{-5} в масштабах стандартных геодезических сетей. Точность их определения оценивается значениями не ниже 10^{-7} . Для разработки подходов к прогнозированию землетрясений исследование пресейсмических деформационных процессов важнее, чем констатация их косейсмических характеристик. Теория (гипотеза) упругой отдачи Рейда постулирует примерное равенство величин пре- и косейсмических деформаций в пределах сейсмического цикла в связи со сбросом накопленных упругих напряжений во время образования сейсмического разрыва. Эти обстоятельства дают возможность эффективного использования повторных многократных и непрерывных геодезических наблюдений [Blewitt, 2018] в сейсмоактивных районах для изучения процессов подготовки сильных коровых сейсмических событий.

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) предоставляют точные измерительные данные о деформировании земной поверхности с ежесуточными повторениями. Глобальная сеть непрерывных ГНСС наблюдений содержит десятки тысяч наблюдательных станций, непрерывно действующих десятилетиями. Получение цифровых моделей деформации на обширных территориях с суточным временным разрешением и объединение их в единую кинематическую визуализацию позволяют изучать особенности и закономерности сейсмодформационного процесса – аналогично анализу синоптических погодных анимаций.

В настоящем исследовании проанализирована эволюция сейсмодформационных процессов на интервалах от лет до десятилетий. Ретроспективно определены места возникновения сильных землетрясений Северо-Американского побережья, Турции и Японии. Зарегистрированы процессы миграции деформации сдвига, провоцирующей

сильные сейсмические события, такие как землетрясение Напа ($M_w = 6.0$, США, Калифорния, 2014 г.) и серия землетрясений Риджкрест ($M_w = 6.4$, $M_w = 7.1$, США, Калифорния, 2019 г.). Скорости распространения триггерной волны получены равными 20 и 7 км/год соответственно. Величины спусковой деформации имеют порядок единиц 10^{-6} . Накопленный эмпирический материал использован для разработки прогноза очередного сильного землетрясения в районе Паркфилд, Калифорния (разломная зона Сан-Андреас).

Проанализированы характеристики дефицита смещений, представляющие собой модуль вектора горизонтального перемещения пункта ГНСС, накопленного за годы и десятилетия перед сильными землетрясениями США (Калифорния), Японии (о-в Кюсю), Турции (оз. Ван). Время накопления составило 3–13 лет. Во всех случаях перед главными событиями в районе будущих эпицентров сформировались зоны дефицита смещений.

Кочаряном Г.Г. [Кочарян, 2009] убедительно показано (406 000 событий), что скорость деформации разломной зоны является фундаментальным параметром, определяющим закономерности генерации динамических событий. При слишком больших скоростях деформации не происходит упрочнения сплошности, а следовательно, маловероятно и возникновение динамической неустойчивости. Наблюдаемые изменения дефицита смещений показывают, что в области возникновения будущего сильного события за счет повышения плотности происходит концентрация масс, препятствующая перемещениям корового материала под действием глобальных движений тектонических плит и способствующая накоплению упругих напряжений. Это предположение не противоречит недавним исследованиям [Shi Chen, 2016] в связи с сильным землетрясением Непала ($M_w = 7.8$, 2015 г.) и землетрясением Венчуан ($M_w = 7.9$, 2008 г.). Высокоточные абсолютные измерения силы тяжести показали, что перед землетрясением Венчуан вблизи будущего эпицентра происходило увеличение силы тяжести, что может быть вызвано деформацией и сопутствующим перераспределением масс [Yong Zhang, 2020].

Литература

- Кочарян Г.Г. Динамика деформационных характеристик разломных зон // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 2. С. 47–55.
- Blewitt G., Hammond W.C., Kreemer C. Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science // Eos. 2018. DOI:10.1029/2018EO104623
- Shi Chen, Mian Liu, Lelin Xing, Weimin Xu, Wuxing Wang, Yiqing Zhu, Hui Li. Gravity increase before the 2015 Mw 7.8 Nepal earthquake // Geophysical research Letters. 2016. V. 43. P. 111–117. DOI:10.1002/2015GL066595
- Yong Zhang, Shi Chen, Lelin Xing, Mian Liu, Zhitang He. Gravity Changes Before and After the 2008 Mw 7.9 Wenchuan Earthquake at Pixian Absolute Gravity Station in More Than a Decade // Pure Appl. Geophys. 2020. V. 177. P. 121–133. DOI:10.1007/s00024-019-02356-4

ЧЕМ DAS ПОЛЕЗЕН ДЛЯ НАС

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: kvkislov@yandex.ru

(устный доклад)

Волоконно-оптическое распределенное акустическое зондирование (distributed acoustic sensing, DAS) – технология использования оптического волокна в качестве линейного набора сейсмических приборов. Она основана на рассеянии света в оптических волокнах (бриллюэновском, рамановском или рэлеевском). При прохождении импульса света по волокну каждому его кусочку, который можно считать виртуальным сейсмическим прибором, соответствует участок записи обратного рассеяния. Амплитудное или фазовое изменение этого участка при прохождении следующего импульса говорит о том, что оптоволоконный кабель подвергается какому-либо воздействию.

Технология DAS освоена для мониторинга элементов строительных конструкций, дамб, насыпей, склонов, оползней, проседаний и трещин. Все более активно она применяется при вертикальном сейсмическом профилировании, при разведке и добыче нефти и газа (в т.ч. для контроля гидроразрыва). Используется DAS и для сейсмической томографии.

Перечислим преимущества, которые обуславливают столь бурное развитие DAS.

- DAS позволяет организовывать массив сейсмических пунктов большой протяженности;
- беспрецедентно высокое пространственное разрешение (метры и даже сантиметры);
- широкий частотный диапазон;
- возможность использования уже существующих телекоммуникационных волоконно-оптических сетей; возможность непрерывной работы; длительный срок службы;
- DAS нечувствительно к электромагнитным полям и само их не порождает;
- рабочая температура $-60 \div 250^{\circ}\text{C}$; работоспособно при высоком давлении (до 180 МПа);
- быстрое развертывание с минимальным подключением нового оборудования, особенно на уже существующих телекоммуникационных волоконно-оптических сетях;

- требуется один блок опроса, расположенный на одном конце волокна в удобном месте;
- нет проблемы синхронизации между виртуальными датчиками;
- не нужны индивидуальные источники питания датчиков и их обслуживание;
- высокая частота дискретизации сигнала позволяет исключить алиасинг;
- надежность и низкая стоимость; широкая распространенность материалов;
- передача данных в реальном времени; возможна параллельная регистрация температуры.

Технология DAS весьма перспективна, особенно для быстрого развертывания наблюдений (например, для исследования афтершоков), для обследования территорий слабой сейсмичности и мест, где организация пунктов наблюдения затруднена (морское дно, мегаполис, вулкан, ледник и т.д.). Однако есть и нерешенные проблемы:

- DAS может быть реализовано на кабеле (участке кабеля) ограниченной длины, рекорд – 175 км. Таким образом, DAS не может быть развернуто на всей длине трансокеанских линий связи;
- DAS регистрирует только осевую деформацию оптоволокна;
- более высокий уровень шума, чем у обычных широкополосных сейсмометров; существующие кабели связи обычно проложены по шумным местам;
- кабели обычно не проходят по прямой линии, т.е. направление чувствительности от одного виртуального датчика к другому меняется;
- связь между волокном и землей разная по длине кабеля – таким образом, передаточная функция у разных участков кабеля разная; полные передаточные функции DAS не определены и зависят еще и от толщины волокна, и от угла падения и частотного состава сигнала;
- собственный шум DAS в настоящее время строго не оценивался; SNR разных участков кабеля разное и увеличивается с расстоянием от блока опроса;
- расположение датчиков трудноопределимо, особенно на ранее проложенных кабелях;
- оценка магнитуды и фокусного механизма с помощью DAS остается открытым вопросом;
- традиционные методы обработки сейсмических массивов требуют тщательной оценки;
- метрология измерений, мягко говоря, слабовата.

К тому же существуют некоторые затруднения, связанные с физикой метода и несовершенством алгоритмов измерений. Например, такие как

- дисперсия импульса (спектральная и модовая) увеличивает его длительность и приводит к снижению рабочей длины волокна;
- спекл-шум или замирание сигнала приводит к тому, что сигнал с некоторых участков кабеля становится ниже уровня шума.

Технология DAS развивается. Проведены испытания двунаправленных оптических повторителей для увеличения рабочей длины волокна, для устранения замирания сигнала используют chirпированные импульсы или набор импульсов разных частот, межмодовую дисперсию подавляют за счёт волокон с градиентным профилем преломления сердцевины и т.д. Сейчас DAS можно использовать во множестве геофизических приложений, таких как сейсмическая томография и мониторинг микроземлетрясений; изучение мелкомасштабной структуры земной коры и верхней мантии; мониторинг вечной мерзлоты и сейсмология ледников; инженерная геофизика и визуализация окружающего шума, в том числе исследования в мегаполисах; сейсмология морского дна; изучение движений активных разломов; сейсмология землетрясений; изучение других планет.

Перед разработчиками оборудования, методов и программ обработки еще много задач:

- необходимы корректные измерения истинных амплитуд движения грунта;
- для DAS надо создать новые чувствительные волокна и разработать методы их укладки;
- опросные блоки должны легко подключаться к волокнам любого типа;
- должна быть разработана метрология, в том числе методы калибровки DAS по традиционным сейсмометрам, с возможностью совместной работы.

Еще возникает проблема данных. Если каждая система DAS будет давать несколько терабайт данных в сутки, их надо будет как-то архивировать, хранить с возможностью последующего использования. Для обработки данных различных экспериментов по DAS привлекается аппарат искусственного интеллекта. Эта работа должна быть расширена.

С большой вероятностью можно предположить, что в ближайшие пять–семь лет произойдет смена парадигмы теоретической сейсмометрии и сейсмологии в целом.

Дополнительные материалы, а также список литературы можно найти в презентации, размещенной на сайте Института.

О ВОЗНИКНОВЕНИИ СЕРИИ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ФЕНОМЕНОВ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ МАГНИТУДОЙ 5.4, ПРОИЗОШЕДШЕГО 25 ИЮНЯ 2021 ГОДА ВБЛИЗИ ГОРОДА ЯЙЛАДЕРЕ (ТУРЦИЯ)

Коган Л.П.¹, Канониди К.Х.², Вольвач А.Е.³, Надежка Л.И.⁴, Бубукин И.Т.⁵,
Боборыкина О.В.⁶, Штенберг В.Б.¹, Биазитов Д.Т.⁷

¹ Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород, Россия

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

³ Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Крым, Россия

⁴ Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

⁵ Научно-исследовательский радиофизический институт при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

⁶ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

⁷ Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

E-mail: L.kog@list.ru

(устный доклад)

В работе изучается совокупность детерминированных явлений, которые имели место в течение последних нескольких часов перед землетрясением магнитудой $M = 5.4$ с эпицентром 39.196°N , 40.165°E (в 8 километрах от г. Яйладере (Турция)), момент начала которого зафиксирован в 18:28:37 (UTC) 25.06.2021. При исследовании были рассмотрены свойства статистики измерений магнитного поля, проведенных на полигоне Крымской астрофизической обсерватории РАН (КраО РАН) в Качивели (Республика Крым) в интервале 00:00:00 24.06.2021 – 23:59:59 25.06.2021. При поиске предвестников надвигающегося сейсмического события был использован подход, ранее примененный в работе [Коган, 2015] и в модифицированном виде в [Коган, 2021]. Он основан на изменении свойств вероятностного распределения любого случайного процесса при появлении в его составе слагаемого, которое статистически слабо связано с совокупностью обычно протекающих явлений.

В результате удалось обнаружить ряд повторяющихся феноменов с высокой степенью детерминированности, возникающих на этапе «итоговой подготовки» надвигающегося землетрясения. Эти явления с высокой вероятностью являются предвестниками предстоящего вскоре землетрясения. Таким образом, статистические методы могут быть применены, в частности, не только в рамках теории Гутенберга – Рихтера [Gutenberg, 1956], [Amitrano, 2012], которая позволяет оценивать возможность землетрясений заданной магнитуды на среднесрочных, порядка месяцев и лет, временных отрезках, но и применительно к небольшим, порядка нескольких часов, интервалам времени перед началом надвигающихся сейсмических событий, что близко к режиму текущего времени.

Литература

- Коган Л.П.* Изменение статистических функционалов от критической частоты слоя F2 ионосферы перед сильными землетрясениями // Геомagnetизм и аэрономия. 2015. Т. 55. № 4. С. 525–539.
- Amitrano D.* Variability in the power-law distributions of rupture events, how and why does b-value change // Eur. Phys. J.-Spec. 2012. V. 205. № 1. P. 199–215.
- Gutenberg B., Richter C.* Magnitude and energy of earthquakes // Annali di Geofisica. 1956. V. 9. № 1. P. 1–15.
- Kogan L.P., Bubukin I.T., Shtenberg V.B.* To the question of calculating the probability of strong earthquakes in real time // Chaos, Solitons and Fractals. 2021. V. 145. Article 110807.

ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА КОСМОС-1809

Костин В.М.

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

E-mail: kostin@izmiran.ru

(стендовый доклад)

При подготовке проведения совместных советско-американских экспериментов по контролю (СЭК) подземных ядерных взрывов (ПЯВ) обратились к директору ИЗМИРАН В.В. Мигулину с предложением проверить возможность контроля ПЯВ со спутника [Костин, 2002]. Было известно, что сотрудники ИЗМИРАН получили диплом за обнаружение со спутника эффектов воздействия землетрясений и их предвестников на ионосферу [Мигулин, 1985]. В.В. Мигулин принял решение воспользоваться спутником Росгидромета Космос-1809, так как он был его научным руководителем.

Первые, спланированные комплексные измерения 16.10.1987 ионосферных эффектов ПЯВ со спутника и э/м импульсов после ПЯВ наземным КНЧ-ОНЧ комплексом показали:

1. Сильные изменения спектра КНЧ-ОНЧ сигналов при прохождении спутником меридиана, ближайшего к Семипалатинскому полигону, через 8 и 16 часов после ПЯВ.
2. Возможность оценить эквивалент ПЯВ по э/м импульсу, исходя из модели вытеснения магнитного поля из объема плазменного шара.

Ионосферные эффекты после СЭК в Неваде 16.08.1988 и Семипалатинске 14.09.1988 наблюдались в течение 3-х дней [Костин, 2002]. Эквивалент ПЯВ на Семипалатинском полигоне был определен с точностью в несколько процентов [Беляев, 2003]. Последующий мониторинг до 1993 г. со спутника Космос-1809 обнаружил возмущения в ионосфере после ПЯВ на всех полигонах. Опыты с небольшими эквивалентами до 10 кт определялись по изменениям в ионосфере над ближайшими СДВ-передатчиками после прохождения ПИВ. Во время проведения эксперимента Тексаркана 11.11.1991 спутник пролетал над Невадой, и были зарегистрированы резкие возмущения в ионосфере от ЭМИ, прохождения акустической волной D, E, F-слоев.

Дополнительные, углубленные исследования эффектов прохождения акустической волны от ПЯВ по данным спутника Космос-1809 последовали после теоретических работ [Абурджания, 2006]. Расчеты показали, что нелинейное взаимодействие сильной акустической волны с неоднородной ионосферой может приводить к формированию как отдельных тропических циклонов (ТЦ), так и их цепочки [Абурджания, 2013].

Такое поведение ТЦ наблюдалось после ПЯВ Франции в ноябре 1990 г. [Kostin, 2020], серии ПЯВ США в июне и сентябре 1992 г., а также ПЯВ Китая 25.09.1992 [Kostin, 2018], [Kostin, 2020a].

Отметим, что ТЦ возбуждают не только коровые сейсмические толчки при прохождении континентальных шельфов [Fan, 2019], но влияют на глобальную активность литосферных землетрясений (доклад на этой конференции).

Литература

- Абурджания Г.Д.* Самоорганизация нелинейных вихревых структур и вихревой турбулентности в диспергирующих средах. М.: URSS. 2006. 325 с.
- Абурджания Г.Д., Харшладзе О.А., Чаргазия Х.З.* Самоорганизация ВГВ структур в неоднородной ионосфере. 2. Нелинейные вихревые структуры // Геомagnetизм и аэрономия. 2013. Т. 53. № 6. С. 797–808.
- Беляев Г.Г.* Вариации УНЧ-КНЧ полей, вызванные мощными взрывами и сейсмической активностью. Кандидатская диссертация. ИЗМИРАН. 2003.
- Костин В.М., Мурашев В.Д.* Экспериментальные исследования возможностей спутникового радиомониторинга подземных ядерных испытаний // Рожденная атомным веком: сб. ст. / Под ред. А.П. Васильева. М.: ССК, 2002. Т. 3. С. 178–191.
- Костин В.М., Беляев Г.Г., Трушкина Е.П., Овчаренко О.Я.* Эффекты воздействия на ионосферу мощных техногенных источников летом 1992 г. по данным спутника Космос-1809 // Материалы 16-й Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ, 2018. С. 473.
- Мигулин В.В., Ларкина В.И., Молчанов О.А., Наливайко А.В.* Способ прогнозирования землетрясений // Авторское свидетельство SU 1171737 А, 07.08.1985. Бюл. № 29.
- Fan W., McGuire J.J., de Groot-Hedlin C.D., Hedlin M.A.H., Coats S., Fiedler J.W.* Stormquakes // Geophysical Research Letters. 2019. V. 46. № 22. P. 12909–12918.
- Kostin V.M., Belyaev G.G., Ovcharenko O.Ya., Trushkina E.P.* The relationship between the development of tropical cyclones and strong earthquakes in June 1992 according to the monitoring of the plasma of the ionosphere from the satellite Cosmos-1809 // Proceeding of the 18th conference «Modern problems of remote sensing of the Earth from space». Moscow: IKI, 2020a. P. 401.
- Kostin V., Belyaev G., Ovcharenko O., Trushkina E.* Impact of France Nuclear Tests on typhoons and Earthquakes in November 1990 // International Journal of Engineering Research & Science. 2020. V. 6. № 12. P. 25–31.

ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИКИ РАЗЛОМОВ В ИНТЕРЕСАХ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Кочарян Г.Г.

*Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН,
г. Москва, Россия*

E-mail: gevorgkidg@mail.ru

(устный доклад)

Подход к прогнозу землетрясений как к решению физической задачи предполагает поиск признаков готовящегося события, которые могут быть зарегистрированы инструментально. Как известно, основными источниками неглубоких землетрясений являются динамические подвижки по уже существующим разломам земной коры. Соответственно, важнейшим «продуктом» исследований геомеханики разломных зон в интересах прогноза землетрясений является установление таких макроскопических параметров, контролирующего деформационный процесс, которые могут быть измерены в натуральных условиях. Глобальной же задачей этого относительно нового направления в науках о Земле является построение расчетной модели деформационных процессов в земной коре, основанной на физических принципах и успешно выполняющей прогностические функции.

В обзорном докладе рассматриваются достижения последних двух десятилетий, полученные в этой области как в ИДГ РАН, так и другими научными коллективами. Анализируются различные аспекты проблемы. Так, построение адекватной структурной модели является непременным условием продвижения в понимании того, как организован процесс деформирования и какие явления доминируют в том или ином пространственно-временном диапазоне. Свойства ядра сейсмогенного разлома, его зоны влияния, процессов разрушения и залечивания, присутствие флюидов и их перетоки во многом определяют закономерности распространения разрыва и особенности излучения сейсмической волны. Недавние наблюдения показали, что для разломов характерен гораздо более широкий диапазон режимов скольжения, чем изначально предполагалось. Быстрые динамические явления сосуществуют с гораздо более медленными движениями, которые могут играть существенную роль в инициировании крупных землетрясений.

Пространственные и временные условия старта и остановки динамических разрывов являются «Святым Граалем» прогноза. Несмотря на предпринимаемые усилия, они до сих пор представляют, пожалуй, крупнейшую загадку науки о землетрясениях. Слабые сейсмические события и асейсмические процессы, события в ионосфере и вариации атмосферного давления, разнообразные процессы, связанные с флюидами, антропогенная деятельность перераспределяют тектоническую нагрузку, изменяют свойства разломных зон

и, следовательно, могут влиять на место зарождения, время и свойства возможных крупных событий.

Структура сейсмогенных разломов включает сильно локализованные тонкие слои сдвига, по которым происходит основная часть косейсмических перемещений. Это приводит к заключению, что сопротивление таких слоев сдвигу – часто называемое «трением на разломе» – является основным и потенциально доминирующим компонентом общей проблемы определения закономерностей подготовки, старта и остановки динамического скольжения.

В целом, выполненный анализ демонстрирует готовность научного сообщества к постановке и проведению согласованных исследований, направленных на построение комплексной, основанной на физических принципах модели деформационных процессов в разломных зонах, происходящих на протяжении всего цикла их эволюции. Нельзя исключить, что такая модель в будущем будет способна успешно выполнять прогностические функции.

КАРТА ПРОДУКТИВНОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА

Крушельницкий К.В., Маточкина С.Д.

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

E-mail: kirillkrush@mail.ru

(стендовый доклад)

Механизмы переноса напряжений и вероятностные модели широко исследовались для объяснения особенностей кластеризации землетрясений. Однако эти подходы все еще далеки от того, чтобы связать отдельные события и определить количество землетрясений, вызванных одним событием. Альтернативный подход, основанный на функциях близости, позволяет генерировать иерархические деревья кластеризации и идентифицировать пары ближайших соседей между последовательными уровнями иерархии. Тогда продуктивность землетрясения – это количество событий следующего уровня, с которыми оно связано. Для учета масштабной инвариантности мы используем относительный порог магнитуды ΔM . Недавно было показано, что относительная продуктивность, связанная с каждым событием, является случайной величиной, которая следует экспоненциальному распределению. Экспоненциальная скорость этого распределения не зависит от магнитуды инициирующих событий и систематически уменьшается с глубиной. Было обнаружено, что выделяются области повышенной средней продуктивности, в которых оказались очаги двух сильных землетрясений: Ближне-Алеутское (17.07.2017, $M = 7.8$) и Южно-Озерновское (29.03.2017, $M = 6.6$).

Литература

- Baiesi M., Paczuski M. Scale-free networks of earthquakes and aftershocks // Phys. Rev. E. 2004. V. 69. Article 066106.
- Shebalin P.N., Baranov S.V., Dzeboev B.A. The Law of the Repeatability of the Number of Aftershocks // Doklady Earth Sciences. 2018. V. 481. P. 963–966.
- Shebalin P.N., Narteau C., Baranov S.V. Earthquake productivity law // Geophysical Journal International. 2020. V. 222. № 2. P. 1264–1269.
- Zaliapin I., Ben-Zion Y. Earthquake clusters in southern California I: identification and stability // J. geophys. Res. 2013. V. 118. № 6. P. 2847–2864.

ХАРАКТЕРНЫЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ РУДОНОСНЫХ УЗЛОВ КАВКАЗА И АЛТАЙ-САЯНСКОГО РЕГИОНА

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

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

E-mail: artem@mitp.ru

(стендовый доклад)

В работе рассматриваются горно-складчатые системы Кавказа и Алтай-Саяна, в которых преобладает полиметаллическое оруденение и известно достаточно большое количество месторождений металлов разных масштабов. Целью работы является определение характерных геолого-геофизических признаков мест локализации месторождений металлов. В современных металлогенических исследованиях связь рудных месторождений с узлами пересечения линеаментов установлена во многих регионах с различной тектонической обстановкой (например, [Лопатин, 2002; Перцов, 1994; 2002; Гатинский, 2006]). Представленная работа основывается на установленной ранее связи крупномасштабного оруденения с узлами пересечения линеаментов [Гвишиани, 1988] и развивает подход, заложенный в работах [Горшков, 2004; 2006], в которых использовались методы распознавания образов для определения рудоносных узлов пересечений линеаментов в горных поясах Средиземноморья.

Работа выполнялась в два этапа. На первом этапе методом морфоструктурного районирования были выделены узлы пересечения линеаментов и рассмотрена пространственная связь рудных месторождений с узлами. В каждом рассматриваемом регионе установлено, что крупномасштабные месторождения локализованы в окрестностях узлов пересечений линеаментов. Сведения о месторождениях взяты из базы данных, сформированной в ГГМ РАН им. В.И. Вернадского [Рундквист, 2004; Ткачев, 2006], а также из [Mineral., 2000]. В Алтай-Саянском регионе большинство месторождений располагаются в радиусе 25 километров от точек пересечения линеаментов; на Кавказе это расстояние составляет 30 км. Для Кавказа, помимо крупномасштабных месторождений, установлена связь с узлами месторождений металлов средних и мелких размеров. В Алтай-Саянском регионе в исследовании рассматривались узлы, в которых находятся только крупные и суперкрупные месторождения металлов, а на Кавказе рассматривались все известные месторождения, вплоть до мелких. Все узлы были охарактеризованы единым набором геолого-геофизических параметров, которые включали следующую информацию:

- контрастность и интенсивность тектонических движений на основе данных о высотах рельефа в узле, сочетаниях типов рельефа, площади молодых рыхлых отложений;

- параметры геометрии линеаментно-блокового строения региона, которые характеризуют раздробленность узлов;
- гравиметрические и магнитные параметры, которые косвенно указывают на наличие неоднородностей в окрестностях узлов.

На втором этапе с помощью алгоритма распознавания образов КОРА-3 [Гельфанд, 1976] были определены характерные геолого-геофизические и геоморфологические признаки, на основе которых в каждом регионе все узлы были разделены на 2 класса:

- класс **Р**, рудоносные узлы;
- класс **НР**, нерудоносные узлы.

В процессе обучения алгоритм определил характерные признаки для каждого класса. На этапе классификации все узлы каждого региона были разделены на рудоносные в зависимости от преобладающего количества признаков каждого класса. В результате в каждом регионе были определены потенциально рудоносные узлы, характерные признаки которых представлены интервалами численных значений использованных геолого-геофизических и геоморфологических параметров.

Литература

- Гатинский Ю.Г., Ткачев А.В., Рундквист Д.В. Геодинамические аспекты распределения крупных и суперкрупных месторождений в глобальных металлогенических поясах и провинциях. 2006.
- Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Ранцман Е.Я., Систернас А., Соловьев А.А. Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. М.: Наука, 1988. 176 с.
- Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Кейлис-Борок В.И., Кнопоф Л., Пресс Ф., Ранцман 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. Том. 1. Глобальные закономерности размещения / ред. Д.В. Рундквист. М.: ИГЕМ РАН, 2006. С. 361–374.
- Лопатин Д.В. Линеаментная тектоника и месторождения-гиганты Северной Евразии // Исследование Земли из космоса. 2002. № 2. С. 77–91.
- Перцов А.В., Гальперов Г.В., Смирнова Т.Н., Антипов В.С. Прогнозно-поисковые модели крупнейших рудных объектов на основе материалов дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. 1994. № 6. С. 96–107.
- Перцов А.В., Антипов В.С., Гальперов Г.В., Турченко С.И. Линеаментная сеть, контролирующая размещение суперкрупных месторождений России // Доклады РАН. 2002. Т. 383. № 1. С. 87–89.

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.

Ткачев А.В., Рундквист Д.В., Черкасов С.В., Вишневская Н.В., Гатинский Ю.Г., Чесалова Е.И., Арбузова Е.Е., Лебедев И.О., Кутузова Н.И. База данных крупных и суперкрупных месторождений мира // Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых. В трех томах. Том 1. Глобальные закономерности размещения / ред. Д.В. Рундквист. М.: ИГЕМ РАН, 2006. С. 21–48.

Mineral atlas of the world. Geological survey of Norway, 2000. 400 p.

ЦИКЛЫ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКОГО ПРЕДВЕСТНИКА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Лопатин М.Н.^{1,2}, Семенов Р.М.^{2,3}

¹ Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

² Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

³ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск,
Россия

E-mail: lopatin@geogr.isu.ru

(устный доклад)

Если рассматривать широкий спектр геохимических предвестников землетрясений, то циклические изменения преимущественно естественного характера ярко наблюдаются в почвенном радоне-222. На колебаниях указанного изотопа прослеживается гравитационное воздействие Луны и Солнца [Адушкин, 2012], суточная и сезонная смена атмосферных температур, воздействие осадков и прочее [Микляев, 2017]. Почвенный радон – предвестник поверхностный, поэтому влияние внешних факторов среды вполне закономерно для него. В то же время циклические изменения в глубинных предвестниках изучены слабее, даже если брать во внимание более подвижный и стабильный гелий [Барсуков, 1992].

Наблюдения за содержанием гелия в подземных водах в Прибайкалье как предвестника сейсмических событий велись в 1970–1990-х годах [Пиннекер, 1985], были возобновлены на период с 2007 по 2019 год на двух артезианских скважинах [Мониторинг ГГД-поля..., дата обращения 01.09.2021]. Кроме того, с 2004 года ведутся наблюдения за содержанием гелия в глубинной воде Байкала в районе Листвянки [Семенов, 2010]. Накопленный объем данных был подвергнут быстрому преобразованию Фурье, на основании которого были рассчитаны частотные характеристики для оценки спектральной плотности мощности и построения периодограмм. Как для скважин, так и для глубинной воды Байкала хорошо просматриваются сезонные пики: зимне-весенний (7.6 / 6.7 месяца) и летне-осенний (3.7 / 4.1 месяца) в Листвянке, зимне-весенний (8 месяцев) и летне-осенний (4.1 месяца) для скважины К-ГИС, полугодовой (6.1 месяца) для скважины Зеленый Мыс. Заметны многолетние циклы, однако их интерпретация затруднена, так как текущий объем выборки не превышает 20 лет. Для скважины К-ГИС ярко выделяются суточные гармоники в 3.5 и 7 дней, которые можно связывать с влиянием солнечно-лунных приливов, однако при детальном анализе была выявлена связь с пробоотбором. Среди проб, доставляемых раз в неделю, свежие демонстрировали сравнительно высокие показания, несмотря на вводимые поправки утечки для остальных.

Результаты, полученные в ходе анализа периодограмм, позволяют создавать фильтры для отсеивания фоновых содержаний и обнаружения колебаний, связанных с подготовкой

очагов землетрясений. Выявленные сезонные гармониками, вероятно, указывают на длительное температурное воздействие с хорошим разделением, характерным для резко-континентального климата.

Литература

- Адушкин В.В., Стивак А.А., Харламов В.А.* Влияние лунно-солнечного прилива на вариации геофизических полей на границе земная кора – атмосфера // Физика Земли. 2012. № 2. С. 14–26.
- Барсуков В.Л., Беляев А.А., Бакалдин Ю.А. и др.* Геохимические методы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1992. 213 с.
- Микляев П.С., Маренный А.М., Цапалов А.А., Петрова Т.Б.* Комплексные мониторинговые исследования формирования радоновых полей грунтовых массивов. Основные результаты // АНРИ. 2017. № 4 (91). С. 2–22.
- Мониторинг ГГД-поля по Байкальскому и Алтае-Саянскому региону / Оценка гидрогеодинамического состояния сейсмоактивных регионов Российской Федерации // ФБГУ «Гидроспецгеология», Центр государственного мониторинга состояния недр и региональных работ. http://geomonitoring.ru/endogen_svodki.html (дата обращения 01.09.2021)
- Пиннекер Е.В., Ясько В.Г., Шкандрий Б.О.* Результаты изучения гидрогеологических предвестников землетрясений в Байкальской рифтовой зоне // Гидрогеохимические предвестники землетрясений. М.: Наука, 1985. С. 259–285.
- Семенов Р.М., Имаев В.С., Смекалин О.П. и др.* Гелий в глубинной воде Байкала – предвестник землетрясений // Доклады РАН. 2010. Т. 432. № 4. С. 533–536.

СЕЙСМИЧЕСКИЙ ШУМ И СЕЙСМИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ НА ЯПОНСКИХ ОСТРОВАХ

Любушин А.А.

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

E-mail: lyubushin@yandex.ru

(устный доклад)

Рассмотрены непрерывные записи сейсмического шума в Японии за период 1997–2021 гг., который включает сейсмическую катастрофу Тохоку 11 марта 2011 г. Анализируются следующие свойства шума: индекс Донохо – Джонстона на основе вейвлетов, ширина носителя мультифрактального спектра сингулярностей и минимальная нормализованная энтропия распределения квадратов вейвлет-коэффициентов.

Исследуется вопрос, можно ли на их основе сформулировать предвестники сильных землетрясений. На временном интервале после мега-землетрясения Тохоку обращено внимание на тренды средних свойств низкочастотного сейсмического шума, отражающие постоянное упрощение статистической структуры сейсмических колебаний. Приведены оценки двумерных плотностей вероятностей экстремальных значений, которые выделяют места, в которых наиболее часто реализуются экстремальные значения свойств сейсмического шума. Оценки плотностей вероятностей экстремальных значений совпадают между собой и имеют максимум в области: $30^{\circ} \text{N} \leq \text{Lat} \leq 34^{\circ} \text{N}$, $136^{\circ} \text{E} \leq \text{Lon} \leq 140^{\circ} \text{E}$.

Основные выводы проведенных исследований заключаются в том, что подготовка сильного землетрясения сопровождается упрощением структуры сейсмического шума. Показано, что всплески когерентности между временными рядами длины дня и характеристиками сейсмического шума в пределах скользящего годового временного окна предшествуют всплескам выделяемой сейсмической энергии. Величина запаздывания в выделении сейсмической энергии относительно всплесков когерентности составляет около 1.5 лет, что может быть использовано для объявления временного интервала высокой сейсмической опасности после достижения пика когерентности.

Литература

Lyubushin A. Low-Frequency Seismic Noise Properties in the Japanese Islands // Entropy. 2021. V. 23. № 4. Article 474. DOI:10.3390/e23040474

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРЫВА БЛИЖНЕ-АЛЕУТСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 17.07.2017 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ РСА- ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

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

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

⁴ Институт наук о Земле, Университет Гренобль-Альпы, ISTerre,
GRENOBLE Cedex 9, France

* E-mail: mikh@ifz.ru, ** E-mail: v.a.timofeeva@iperas.ru

(устный доклад)

Нами построена новая модель поверхности разрыва Ближне-Алеутского землетрясения (БАЗ), произошедшего 17 июля 2017 г. в районе Командорских островов Алеутской островной дуги. Это первая модель, построенная с использованием данных РСА-интерферометрии.

Все проведенные ранее исследования механизма БАЗ [Модель Геологической службы США; *Lau*, 2017; *Чебров*, 2019] показывают, что в результате землетрясения произошел практически чистый правосторонний сдвиг по разлому Беринга. Трудность построения модели поверхности разрыва в случае этого землетрясения состоит в том, что большая часть данных, используемых при построении модели очага, получена на удаленных станциях. В окрестности БАЗ расположено только две станции спутниковой геодезии GPS. Поэтому спутниковые радарные снимки существенно дополняют имеющиеся данные и позволяют получить новые сведения о строении очага землетрясения.

Для исследования были отобраны снимки с 118 трека нисходящей орбиты спутниковой миссии Sentinel-1B. Период съемки охватывал во времени само событие, его ближайший форшок (17.07.2017 11:05:09 UTC, $M_w = 6.3$) и более 100 афтершоков с магнитудой от 4 и более, в том числе 17.07.2017 (23:41:55 UTC) с $M_w = 5.4$ и 28.07.2017 (02:39:15 UTC) с $M_w = 5.5$ (данные с сайта USGS). Обработка снимков производилась методом дифференциальной интерферометрии (DInSAR) с использованием программного пакета SNAP с встроенным плагином SNAPHU, реализующим алгоритм развертки фазы. Интерферограмма пары снимков от 11.07.2017 и 23.07.2017 выявила наиболее четкие смещения в направлении на спутник на о. Медный и на о. Беринга – островах, расположенных в эпицентральной зоне землетрясения. Смещения характеризуют косейсмические и постсейсмические события, произошедшие за 6 дней после БАЗ.

Была выполнена численная проверка согласованности данных РСА-интерферометрии и спутниковой геодезии, а также тестирование гипотезы о том, что сейсмический очаг

состоял из двух разрозненных разрывов. Показано, что модель единого очага хорошо согласуется с данными РСА-интерферометрии, а модель составного очага по характеристике изолиний смещений на островах Беринга и Медный противоречит данным РСА-интерферометрии.

Далее было выполнено формальное решение обратной задачи с заданием смещений на 26 пунктах GPS, опубликованных в работе [Чебров, 2019], и рассчитанных нами смещений по данным РСА-интерферометрии. Рассмотрев три различных значения длины поверхности разрыва по простиранию (330, 350 и 370 км), мы получили, что наилучшим образом направление и размер изолиний для обоих островов (Беринга и Медный) воспроизводится при длине поверхности разрыва, равной 370 км. При этом оцененный по нашей модели размер разрыва (так же, как и размеры разрыва в других моделях очага БАЗ) превосходит средний размер, даваемый статистическими соотношениями для землетрясения $M_w = 7.8$ [Thingbaijam, 2017]. Согласно построенной модели смещения на поверхности разрыва происходили неравномерно, особенно по глубине, но полностью запертых участков, по всей вероятности, все же не осталось.

Расхождение моделей, построенных на основе различных данных, может быть связано с тем, что данные сейсмологии характеризуют часть очагового процесса, сопровождающегося генерацией сейсмических волн, а оценки смещений по данным ГНСС и РСА интерферометрии включают смещения, происходящие, в том числе, и в асейсмическом режиме.

Исследование выполнено по госзаданию ИФЗ РАН, а также при финансовой поддержке гранта Министерства образования и науки № 14.W03.31.0033.

Литература

- Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В., Абубакиров И.Р., Гусев А.А., Дрознина С.Я., Митюшкина С.В., Ототюк Д.А., Павлов В.М., Титков Н.Н. Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с $M_w = 7.8$. I. Протяженный разрыв вдоль Командорского блока Алеутской островной дуги по данным наблюдений на Камчатке // Физика Земли. 2019. № 4. С. 48–71.
- Lay T., Ye L., Bai Y., Cheung K.F., Kanamori H., Freymueller J., Steblov G.M., Kogan M.G. Rupture Along 400 km of the Bering Fracture Zone in the Komandorsky Islands Earthquake (M_w 7.8) of 17 July 2017 // Geophysical Research Letters. 2017. V. 44. № 24. P. 12161–12169.
- Thingbaijam K.K.S., Mai M.P., Goda K. New empirical earthquake source-scaling laws // BSSA. 2017. V. 107. № 5. P. 2225–2246.

УТОЧНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГИПОЦЕНТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ В РАННЕИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ ПЕРИОД

Морозов А.Н.¹, Ваганова Н.В.²

¹ Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН», г. Москва, Россия

² Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика
Н.П. Лаверова УрО РАН, г. Архангельск, Россия

E-mail: morozovalexey@yandex.ru, nvag@yandex.ru

(устный доклад)

В сейсмологии распространены исследования по уточнению параметров очагов ранее произошедших землетрясений в исторический и раннеинструментальный периоды. Как правило, уточнение происходит спустя некоторое время, когда появляется возможность привлечь дополнительные макросейсмические или инструментальные данные, появляются уточненные скоростные модели, новые методические подходы и математические алгоритмы.

В настоящее время благодаря таким проектам, как ISC-GEM (International Seismological Centre – Global Earthquake Model) catalog [Storchak, 2013] и EuroSeismos (ES), открытым доступом к архивным фондам ФИЦ ЕГС РАН у исследователей появилась возможность изучать бюллетени и сейсмограммы сейсмических станций, функционировавших с начала инструментального периода. Это позволяет оценивать параметры очагов землетрясений на основе наиболее полных инструментальных данных, даже в тех случаях, когда ещё совсем недавно параметры очага оценивались только по макросейсмическим данным, с применением современной скоростной модели и усовершенствованных методов локации.

К подобным исследованиям можно отнести исследование [Bungum, 2009] по уточнению параметров Oslofjord Earthquake, произошедшего в Фенноскандии 23 октября 1904 г. с $M_S = 5.4$; исследование [Nietz, 2016] по уточнению землетрясения 10 ноября 1935 г. в районе Montserrat; исследование [Никонов, 2009] по уточнению параметров Сысольского землетрясения 13 января 1939 года на севере Европейской части России; исследование [Маловичко, 2020] по уточнению параметров Билимбаевского землетрясения 1917 года, сильнейшего на Урале; исследование [Morozov, 2019a, 2019b] по уточнению параметров очага землетрясений в Арктике. А также исследования по созданию каталога ISC-GEM (1904–2014) [Storchak, 2013].

Таким образом, в настоящее время созданы благоприятные условия для проведения исследований по уточнению параметров гипоцентров землетрясений, зарегистрированных в раннеинструментальный период.

Исследования выполнены в рамках тем НИР № АААА-А19-119072590031-6 (ИФЗ РАН) и АААА-А18-118012490072-7 (ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН).

Литература

- Маловичко А.А., Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Асминг В.Э., Дягилев Р.А., Евтюгина З.А. Билимбаевское землетрясение 17 августа 1914 г.: параметры гипоцентра по инструментальным данным // Российский сейсмологический журнал. 2020. Т. 2. № 1. С. 40–47.
- Никонов А.А., Чепкунас Л.С. Сысольское землетрясение 13 января 1939 г. на Русской плите – уточнение параметров // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 36. № 4. С. 25–41.
- Bungum H., Pettenati F., Schweitzer J., Sirovich L., Faleide J.I. The 23 October 1904 MS 5.4 Oslofjord earthquake: Reanalysis based on macroseismic and instrumental data // Bulletin of the Seismological Society of America. 2009. V. 99. № 5. P. 2836–2854.
- Morozov A.N., Vaganova N.V., Konechnaya Y.V. The October 14, 1908 MW 6.6 earthquake in the Barents and Kara sea region of the Arctic: Relocation based on instrumental data // Polar Science. 2019a. V. 20. P. 160–166.
- Morozov A.N., Vaganova N.V., Shakhova E.V., Konechnaya Y.V., Asming V.E., Antonovskaya G.N., Evtyugina Z.A. Seismicity of the Arctic in the Early Twentieth Century: Relocation of the 1904–1920 Earthquakes // Bulletin of the Seismological Society of America. 2019b. V. 109. № 5. P. 2000–2008.
- Niemz P., Amorèse D. Relocalizing a historical earthquake using recent methods: The 10 November 1935 earthquake near Montserrat, Lesser Antilles // Journal of South American Earth Sciences. 2016. V. 66. P. 166–179.
- Storchak D.A., Giacomo D.D., Bondára I. et al. Public release of the ISC–GEM global instrumental earthquake catalogue (1900–2009) // Seismological Research Letters. 2013. Т. 84. № 5. С. 810–815.

РАСПОЗНАВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ЦУНАМИГЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ В МАТЕРИКОВОЙ ГРЕЦИИ

Новикова О.В., Горшков А.И.

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

E-mail: onovikov@mitp.ru

(устный доклад)

Цунами зафиксированы в большинстве сейсмоактивных районов Средиземноморья, включая территорию Греции [Soloviev, 1990; Tinti, 2001]. Необходимой информацией для разработки эффективной стратегии снижения ущерба от цунами является знание потенциальных цунамигенных источников. В работе впервые предпринята попытка определить потенциально цунамигенные морфоструктурные узлы с помощью алгоритмов распознавания образов на примере материковой части Греции. Использован подход, предложенный в 70-х годах XX века В.И. Кейлис-Бороком и М.М. Гельфандом [Gelfand, 1972] для идентификации мест возможного возникновения сильных землетрясений, который показал достаточно высокую надежность определения потенциально сейсмоопасных мест [Соловьев, 2014; Gorshkov, 2018]. Задача решена на основе схемы морфоструктурного районирования Греции [Gorshkov, 2020], на которой выделено 139 морфоструктурных узлов, составивших множество объектов распознавания цунамигенных узлов.

Задача распознавания состояла в разделении всех узлов региона на класс цунамигенных (ЦГ) и класс не цунамигенных (НЦГ). Материал обучения для алгоритма распознавания Кора-3 [Gelfand, 1972] составлен на основе глобального исторического каталога цунамигенных землетрясений [Global Historical Tsunami Database http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml]. Из каталога были выбраны землетрясения и ассоциированные с ними цунами, для которых (1) достоверность события > 1 ; (2) высота волны (захлест) ≥ 1 м; (3) интенсивность цунами ≥ 4 . В соответствии с этими критериями обучающую выборку цунамигенного класса составили 12 узлов. Для распознавания цунамигенных узлов использованы морфометрические и геологические параметры, а также параметры, характеризующие геометрию линеаментно-блоковой структуры изучаемой территории.

В результате распознавания из 139 узлов региона к цунамигенным отнесено 27 узлов, включая 12, входивших в обучение. Большинство распознанных цунамигенных узлов расположено на линеаментах первого ранга, отделяющих п-ов Пелопонес от глубоководных впадин Ионического и Критского морей, а также в зоне активного молодого рифта Коринфского залива. Цунамигенные узлы характеризуются не «большими» значениями

максимальных и минимальных высот рельефа в сочетании с «большими» значениями размаха высот и градиента рельефа. Кроме того, цунамигенные узлы характеризуются «большой» площадью рыхлых четвертичных отложений. Совокупность этих особенностей цунамигенных узлов свидетельствует, что они расположены в обстановке контрастного рельефа и устойчивого опускания в условиях растяжения, которые доминируют как в Эгейском бассейне, так и на материковой части Греции [Armijo, 1996]. Считается, что большинство цунами в Средиземноморье [Ebeling, 1996] вызывается подводными оползнями, часто возникающими при землетрясениях в районах, которые примыкают к континентальному склону. «Большие» значения градиента рельефа, характерные для распознанных цунамигенных узлов, расположенных на континентальном склоне Ионического и Критского морей, указывают на высокую крутизну участков континентального склона, входящих в цунамигенные узлы. Это создает условия для возникновения оползней на таких участках склона при сейсмическом воздействии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 20-55-18008.

Литература

- Соловьев А.А., Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Добровольский М.Н., Новикова О.В. Распознавание мест возможного возникновения землетрясений: методология и анализ результатов // Изв. РАН, сер. Физика Земли. 2014. № 2. С. 161–178.
- Armijo R., Meyer B., King G.C.P., Rigo A., Papanastassiou D. Quaternary evolution of the Corinth Rift and its implications for the Late Cenozoic evolution of the Aegean // Geophys. J. Int. 1996. V. 126(1). P. 11–53.
- Ebeling C.W., Okal E.A., Kalligeris N., Synolakis C.E. Modern seismological reassessment and tsunami simulation of historical Hellenic Arc earthquakes // Tectonophysics. 2012. V. 530–531. P. 225–239.
- Gelfand I.M., Guberman Sh., Izvekova M.L., Keilis-Borok V.I., Ranzman E.Ia. Criteria of high seismicity determined by pattern recognition // Tectonophysics. 1972. V. 13. P. 415–422.
- Global Historical Tsunami Database // NGDC/WDS (National Geophysical Data Center, NOAA / World Data Service). DOI:10.7289/V5PN93H7. ULR: http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml
- Gorshkov A., Novikova O. Estimating the validity of the recognition results of earthquake prone areas using the ArcMap // Acta Geophysica. 2018. V. 66. № 5. P. 843–853. DOI:10.1007/s11600-018-0177
- Gorshkov A.I., Novikova O.V., and Gaudemer Y. Strong ($M \geq 7.0$) Earthquake-Prone Areas in Hellenides, Greece // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2020. V. 56. № 1. P. 45–52. DOI:10.1134/S1069351320010036
- Soloviev S.L. Tsunamiogenic zones in the Mediterranean Sea // Natural Hazards. 1990. V. 3. P. 183–202. DOI:10.1007/BF00140432
- Tinti S., Maramai A., and Graziani L. A new version of the European tsunami catalogue: updating and revision // Nat. Haz. Earth Sys. Sci. 2001. V. 1. P. 255–262.

ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ И ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Обжиров А.И.

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
г. Владивосток, Россия*

E-mail: obzhirov@poi.dvo.ru

(устный доклад)

Известно, что перед землетрясением идет сейсмическая активизация. Происходит увеличение сейсмических колебаний, открываются бывшие разломы, образуются новые трещины, и они становятся путями миграции из недр газофлюидных потоков. Интересно, что животные чувствуют как усиление сейсмических колебаний, так и появление на поверхности газа различного состава. Животные проявляют беспокойство, убегают из опасного района, слоны уходят от моря в горы в предчувствии возможного землетрясения в море и затопления прибрежной полосы волнами цунами.

Существует сейсмический метод предсказания этого явления. Другой важный метод оценки сейсмической активизации и предсказания землетрясений разработан в газогеохимической лаборатории ТОИ ДВО РАН. Изучается газовая составляющая в воде рек и морей, донных осадков, углей и пород на суше. Газ извлекается из воды и осадков и пород на дегазационной установке. На хроматографе в газе определяются метан (CH₄), его гомологи (C₂-C₅), CO₂, H₂, He, O₂, N₂ [Обжиров, 1993]. Начиная с 1980 года в каждой экспедиции выполнялся комплекс геологических, океанологических, геофизических (сейсмических, акустических, электромагнитных, гравиметрических), газогеохимических исследований. В процессе комплексных экспедиционных исследований на море и суше были установлены следующие закономерности:

- аномалия концентраций углеводородного газа характеризует, что разлом пересекает толщу осадков, которая насыщена углеводородами, возможно, в форме залежи;
- аномалии концентраций углекислого газа, часто водорода дают основание предположить, что в геологическом разрезе, возможно, присутствуют изверженные породы и идет активизация вулканической деятельности;
- аномалии гелия и часто водорода характеризуют проникновения разлома до мантии, его открытость благодаря сейсмическим подвижкам, то есть повышение геодинамики и изменение геологического строения района исследования.

Следует отметить, что аномальные газовые поля оказывают влияние на физические поля. Например, наличие аномального количества газа в донных осадках изменяет скорость сейсмических и акустических характеристик. Уменьшается скорость прохождения волн,

иногда появляется область отсутствия отражений. Интерпретация этих изменений часто недостаточно объяснима, если не изучалась газовая составляющая. Кроме того, сейсмические, акустические записи важно использовать для прогноза залежей углеводородов, картирования зон разломов. Но глубину зоны разлома и его сейсмическую современную активность трудно понять и объяснить без исследований газовой составляющей. Интерпретация акустической съемки толщи воды также сложна без знания объема газа в воде, особенно в различных слоях толщи воды.

Отметим, различные компоненты газа, упомянутые выше, способствуют формированию восстановительной и окислительной среды. Этот процесс влияет на формирование аутигенных и рудных минералов, одни из которых подвижны в восстановительной среде, другие – в окислительной. Эти изменения можно зафиксировать электромагнитными измерениями, которые будут меняться соответственно.

Таким образом, газовая составляющая воды, донных осадков, пород суши является важной газогеохимической характеристикой для оценки сейсмической активизации и прогноза землетрясений в комплексе с геологическими, геофизическими и другими исследованиями в Мировом океане и его обрамляющей суши.

Литература

Обжиров А.И. Газогеохимические поля придонного слоя морей и океанов. М.: Наука, 1993. 139 с.

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРФЕЙСА ТЕКТОНИЧЕСКОГО РАЗЛОМА ПО ДАННЫМ СЛАБОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ

Остапчук А.А.

*Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН,
г. Москва, Россия*

E-mail: ostapchuk.aa@idg.ras.ru

(устный доклад)

В 1910 году Г. Рейд впервые аргументировано изложил гипотезу о приуроченности землетрясений к разломам земной коры, а развитие плотных сетей сейсмических станций и цифровых технологий анализа сейсмограмм позволили продемонстрировать это явным образом [Кочарян, 2016]. Установление закономерностей формирования и эволюции очага землетрясения является критически важным для прогнозирования и управления сейсмическим режимом.

Описание высокочастотного движения в ближней зоне очага землетрясения показывает сильную неоднородность полей смещения и сброса напряжений вдоль плоскости разрыва. В плоскости разлома выделяются особые зоны локализации напряжений, так называемые аспериты, в окрестности которых косейсмические смещения максимальны, а вклад сейсмической составляющей в тектоническую деформацию близок к единице. Представление о структуре и фрикционных свойствах аспериты как зон локализации косейсмических смещений опирается на данные прямых и косвенных наблюдений: геологические исследования эксгумированных разломов, их глубинное бурение, сейсмическая томография и т.д. [Ружич, 2009; Ма, 2006; и др.]. Повышение точности локации землетрясений позволяет использовать данные высокоточных каталогов сейсмического мониторинга с целью исследования внутренней структуры тектонического разлома [Valoroso, 2014]. В настоящей работе на основе высокоточного сейсмического каталога Северной Калифорнии исследуются структурные особенности интерфейса тектонических разломов.

Закономерности локализации слабой сейсмичности проявляют основополагающие структурные свойства разломов. Интерфейс разлома, как и все реальные поверхности, характеризуется определенной топографией. Вследствие волнистости и шероховатости поверхностей взаимодействие берегов происходит не по всей плоскости разлома, а только в локальных зонах. Отчетливо прослеживается тенденция локализации гипоцентров в непосредственной близости друг от друга. Распределение гипоцентров на интерфейсе тектонического разлома характеризуется сильной пространственной кластеризацией, проявляя зоны формирования аспериты. Характерное расстояние между зонами аспериты

составляет для различных разломов от 1 до 5 км. Данные зоны асперити эволюционируют как самоорганизующаяся динамическая система, обладающие статистическим самоподобием, и косейсмический разрыв, зарождающийся на одной и той же асперити, может охватывать различный пространственный масштаб.

Литература

Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. Москва: ГЕОС, 2016. 424 с.

Ружич В.В. Очаг землетрясения как объект геологического изучения // Физика Земли. 2009. № 11. С. 60–68.

Ma K.F., Tanaka H., Song S.R., et al. Slip zone and energetics of a large earthquake from the Taiwan Chelungpu-fault drilling project // Nature. 2006. V. 444. P. 473–476.

Valoroso L., Chiaraluce L., Collettini C. Earthquakes and fault zone structure // Geology. 2014. V. 42. P. 343–346.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ МАГНИТУДЫ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОЙ РЕГИСТРАЦИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Павленко В.А., Завьялов А.Д.

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

E-mail: pavlenko.vasily@gmail.com

(стендовый доклад)

Магнитуда представительной регистрации M_c – это минимальная магнитуда, для которой землетрясения в заданной пространственно-временной области регистрируются в полном объёме. Значение M_c соответствует началу линейной части графика повторяемости землетрясений, поэтому надёжная оценка M_c критически важна для получения корректных оценок параметров Гутенберга – Рихтера. Некорректная оценка величины M_c приводит к получению неадекватных значений параметров сейсмичности и ошибочной интерпретации данных. Значение M_c изменяется в пространстве и во времени, эти вариации необходимо учитывать при работе с каталогами землетрясений для оценки различных параметров сейсмического режима.

В работе сравниваются шесть современных методов оценки M_c : два непараметрических [Wyss, 1999; Amorese, 2007] и четыре параметрических [Wiemer, 2000; Cao, 2002; Woessner, 2005; Писаренко, 1989] метода. Для сравнения методов использованы выборки из реальных инструментальных каталогов землетрясений, а также синтетические каталоги, сгенерированные на основе трёх моделей распределения магнитуды, встречающихся при анализе реальных инструментальных каталогов: модель неоднородной выборки [Woessner, 2005], модель однородной выборки [Mignan, 2012], модель выборки, из которой удалены слабые землетрясения [Garcia-Hernandez, 2019]. Для анализа вариаций оценок M_c использован метод бутстрап [Chernick, 1999]. Проанализированы зависимости двух первых моментов распределений оценок M_c от формы распределения магнитуды и объёма выборки.

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие рекомендации. Метод [Wyss, 1999] следует использовать для анализа представительности малых выборок, объёмом до нескольких десятков событий. Для более объёмных выборок этот метод занижает M_c и не рекомендуется к использованию. Методы [Wiemer, 2000; Cao, 2002] применимы для анализа выборок среднего размера, содержащих от нескольких сотен до нескольких тысяч событий. Применять эти методы к более объёмным выборкам можно, но с большой осторожностью. Метод [Писаренко, 1989] недооценивает M_c на малых выборках, но даёт замечательные результаты для выборок среднего и большого объёма. Методы [Amorese, 2007; Woessner, 2005] признаются неудачными и не рекомендуются к использованию.

Литература

- Писаренко В.Ф. Дискретные свойства геофизической среды. О законе повторяемости землетрясений. М.: Наука, 1989. С. 47–60.
- Amorèse D. Applying a change-point detection method on frequency-magnitude distributions // Bull. Seismol. Soc. Am. 2007. V. 97. № 5. P. 1742–1749. DOI:10.1785/0120060181
- Cao A.M., Gao S.S. Temporal variation of seismic b-values beneath northeastern Japan island arc // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29. № 9. P. 481–483. DOI:10.1029/2001GL013775
- Chernick M.R. Bootstrap methods: a practitioner's guide. Wiley and Sons, 1999. 288 p.
- García-Hernández R., D'Auria L., Barrancos J., Padilla G.D. On the functional expression of frequency-magnitude distributions: a comprehensive statistical examination // Bull. Seismol. Soc. Am. 2019. V. 109. № 1. P. 482–486. DOI:10.1785/0120180197
- Mignan A. Functional shape of the earthquake frequency-magnitude distribution and completeness magnitude // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. B08302. DOI:10.1029/2012JB009347
- Wiemer S., Wyss M. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the Western United States, and Japan // Bull. Seismol. Soc. Am. 2000. V. 90. № 4. P. 859–869. DOI:10.1785/0119990114
- Woessner J., Wiemer S. Assessing the quality of earthquake catalogues: estimating the magnitude of completeness and its uncertainty // Bull. Seismol. Soc. Am. 2005. V. 95. № 2. P. 684–698. DOI:10.1785/0120040007
- Wyss M., Hasegawa A., Wiemer S., Umino N. Quantitative mapping of precursory seismic quiescence before the 1989, M 7.1 off-Sanriku earthquake, Japan // Ann. Geofisc. 1999. V. 42. № 5. P. 851–869. DOI:10.4401/ag-3765

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ УСЕЧЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГУТЕНБЕРГА – РИХТЕРА

Писаренко В.Ф.

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

E-mail: pisarenko@yasenevo.ru

(устный доклад)

В рамках модели усеченного распределения Гутенберга – Рихтера рассмотрена задача оценки параметра M – максимально возможной, региональной магнитуды. Предложена новая оценка параметра M , основанная на оценке максимального правдоподобия с поправкой на смещение, для которого выведена точная формула в виде конечной суммы некоторых функций от максимального значения выборки μ_n . Проведено сравнение новой оценки с некоторыми известными оценками параметра M , и показана её достаточно высокая эффективность. С помощью аналогичной методики получена оценка квантиля $Q_T(q)$ максимальной магнитуды землетрясения в заданном будущем интервале времени T . Показано существенное искажение плотности распределения магнитуд на концах диапазона при использовании модели возмущения магнитуд с помощью случайных ошибок.

ГЕТЕРОКЛИНИЧЕСКИЕ СЕТИ И ХАОС

Подвигина О.М.

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

E-mail: olgap@mitp.ru

(устный доклад)

Гетероклинический цикл является инвариантным множеством динамической системы, состоящим из конечного числа стационарных состояний (или компактных подмножеств более общего вида) и соединяющих их гетероклинических траекторий. Гетероклиническая сеть – это объединение конечного числа гетероклинических циклов.

Траектория вблизи гетероклинической сети находится долгое время около стационарных состояний, а переходы между состояниями происходят существенно быстрее. Таким образом, траекторию можно охарактеризовать последовательностью стационарных состояний, вблизи которых она проходит.

Эта последовательность может состоять из некоторого периодически повторяющегося набора состояний, например, если траектория притягивается к гетероклиническому циклу, являющемуся частью сети. В случае, если такой повторяющейся подпоследовательности не существует, траектория называется хаотичной.

Поведение траекторий вблизи гетероклинической сети существенно зависит от собственных значений операторов линеаризации в окрестности стационарных состояний. Для гетероклинических сетей, рассмотренных в работах [Aguilar, 2005; 2006] было доказано, что из-за комплексных собственных значений в построенных для них отображениях Пуанкаре существует подкова Смейла, и, следовательно, поведение траекторий хаотическое. В работе [Rodrigues, 2016] показано, что при наличии комплексных собственных значений хаос также возможен и при отсутствии подковы.

Примеры хаоса вблизи гетероклинических сетей, где все собственные значения операторов линеаризации действительны, приведены в работах [Postlethwaite, 2005; 2021]. Эти сети имеют сложную топологическую структуру и могут быть представлены в виде объединения девяти или пяти гетероклинических циклов соответственно.

В работе [Podvigina, 2021] мною изучена гетероклиническая сеть, где собственные значения операторов линеаризации действительны, являющаяся объединением двух гетероклинических циклов. Численные исследования указывают, что при изменении параметров системы возможно различное поведение траекторий: они могут притягиваться к одному из циклов или же совершать переходы между циклами регулярно или случайным

образом. Таким образом, предложен пример простой гетероклинической сети, вблизи которой возможно хаотическое поведение.

Литература

- Aguiar M.A.D., Castro S.B.S.D., Labouriau I.S.* Dynamics near a heteroclinic network // Nonlinearity. 2005. V. 18. P. 391–414.
- Aguiar M.A.D., Castro S.B.S.D., Labouriau I.S.* Simple Vector Fields with Complex Behavior // Int. J. Bif. and Chaos. 2006. V. 16. P. 369–381.
- Postlethwaite C.M., Dawes J.H.P.* Regular and irregular cycling near a heteroclinic network // Nonlinearity. 2005. V. 18. P. 1477–1509.
- Postlethwaite C.M., Rucklidge A.M.* Stability of cycling behaviour near a heteroclinic network model of Rock-Paper-Scissors-Lizard-Spock // arXiv:2010.10666v2. 2021.
- Podvigina O.* Behaviour of trajectories near a two-cycle heteroclinic network // arXiv:2107.09982. 2021.
- Rodrigues A.A.P.* Is there switching without suspended horseshoes? // Boletim da SPM. 2016. V. 74. P. 61–79.

WEB-ГИС ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЕКТОВ ИТПЗ РАН

Подольская Е.С., Некрасова А.К., Прохорова Т.В., Трубенков А.В., Селюцкая О.В.

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

E-mail: ekaterina.podolskaia@gmail.com

(стендовый доклад)

Сегодня методы и технологии геоинформатики используются в приложениях и проектах научных учреждений по всему миру, в последнее время особенно активно развивается направление т. н. «открытых» данных (Open Data) и разработок на основе открытого кода (Open Source). Одной из форм Open Source является веб-геоинформационная система [Advances in Web-based GIS..., 2011], позволяющая представить пространственные данные научных проектов академического Института широкой аудитории тематических пользователей при помощи веб-браузеров. Страница интерактивных геоинформационных проектов Института представляет собой опубликованные в веб-ГИС результаты проектов коллектива авторов («Экспертный прогноз сильнейших землетрясений мира» и «Линеаменты и места возможного возникновения сильных землетрясений») с ссылкой на внешний проект AFCAST, представляющий собой автоматизированную систему оценки опасности сильных афтершоков в режиме времени, близком к реальному. Указанные проекты доступны на официальном сайте Института в разделе карт и баз данных (<https://www.itpz-ran.ru/ru/resultaty/maps-and-databases/>). Веб-гис-приложение позволяет решать прикладные задачи пользователей: знакомиться с данными, выполнять измерения по карте, формировать выходные продукты с картографическим изображением.

Проект «Прогнозы» представляет и систематизирует пространственные данные по прогнозу землетрясений в глобальном охвате. Доступ к данным Института организован с учетом разных пользовательских групп и разделен по актуальности данных на группы, доступ к проектам разных временных интервалов предоставляется и контролируется администратором сайта Института. Данные охватывают временной промежуток с 1985 г. по настоящее время, прогнозы землетрясений формируются Институтом дважды в год. Приложение опубликовано на основе настольного QGIS-проекта, содержащего общегеографические слои (внешние источники-сервисы) и тематические данные, которые созданы и подлежат актуализации в рамках проектов Института, по прогнозам землетрясений. Содержательной основой web-ГИС является опубликованная работа [Keilis-Borok, 1990; Healy, 1992; Kossobokov, 1997].

Проект «Линеаменты» суммирует результаты многолетних исследований по распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений в Итальянском

регионе [Gorshkov, 2002; 2003; 2004; 2009]. Эти исследования показали, что сильные землетрясения приурочены к местам пересечений тектонически активных зон разломов – морфоструктурным узлам, местоположение которых определяется методом морфоструктурного районирования, а их классификация по степени сейсмоопасности производится алгоритмами распознавания образов. Линеаменты, сгруппированные по рангам, и узлы оформлены в QGIS Desktop-проекте и опубликованы в веб-гис.

Полученные результаты использования web-ГИС-технологий делают возможным взаимодействие с заинтересованными пользователями при помощи карт и организованного доступа к базам данных результатов проектов. Дальнейшее расширение веб-публикаций возможно и для других проектов Института в 2D и 3D-формах.

Литература

- Advances in Web-based GIS, Mapping Services and Applications / S. Li, S. Dragicevic and B. Veenendaal (eds.). London: CRC Press, 2011. 400 p. DOI:10.1201/b15452
- Gorshkov A.I., Panza G.F., Soloviev A.A., Aoudia A. Morphostructural zonation and preliminary recognition of seismogenic nodes around the Adria margin in peninsular Italy and Sicily // JSEE: Spring. 2002. V. 4. № 1. P. 1–24.
- Gorshkov A.I., Panza G.F., Soloviev A.A., Aoudia A. Recognition of the strong earthquake-prone areas ($M > 6.0$) within the mountain belts of Central-Europe // Revue Roumaine de Geophysique. 2003. V. 47. P. 30–41.
- Gorshkov A.I., Panza G.F., Soloviev A.A., Aoudia A. Identification of seismogenic nodes in the Alps and Dinarides // Bolletino della Societa Geologica Italiana. 2004. V. 123. P. 3–18.
- Gorshkov A.I., Panza G.F., Soloviev A.A., Aoudia A., Peresan A. Delineation of the geometry of the nodes in the Alps-Dinarides hinge zone and recognition of seismogenic nodes ($M \geq 6.0$) // Terra Nova. 2009. V. 21. № 4. P. 257–264. DOI:10.1111/j.1365-3121.2009.00879.x
- Healy J.H., Kossobokov V.G., Dewey J.W. A test to evaluate the earthquake prediction algorithm, M8 // U.S. Geological Survey. 1992. Open-File Report 92–401. DOI:10.3133/ofr92401
- Keilis-Borok V.I., Kossobokov V.G. Premonitory activation of earthquake flow: algorithm M8 // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1990. V. 61. № 1–2. P. 73–83. DOI:10.1016/0031-9201(90)90096-G
- Kossobokov V. User manual for M8 / Healy J.H., Keilis-Borok V.I., Lee W.H.K. (eds). Algorithms for earthquake statistics and prediction. IASPEI software library. 1997. V. 6. Seismological Society of America, El Cerrito. P. 167–221.

ХОЛИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОБЛЕМЕ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В СВЕТЕ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГЕНЕРАЦИИ ПРЕДВЕСТНИКОВ

Пулинец С.А.¹, Богданов В.В.²

¹ Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

² Институт космофизических исследований и распространения радиоволн
ДВНЦ РАН, Камчатский край, с. Паратунка, Россия

E-mail: pulse@rssi.ru; ybogd@ikir.ru

(устный доклад)

Процесс подготовки землетрясения и формирования предвестников рассматривается с позиций неравновесной термодинамики, в основе которой лежит понятие открытой системы, эволюция которой обусловлена процессами самоорганизации. При таком подходе система геофизических оболочек: «литосфера, нейтральная атмосфера, ионосфера» – представляет собой открытую нелинейную систему, которая подвержена внешнему воздействию. В такой системе за счёт внутренней диссипации и согласованного взаимодействия множества ее элементов путем интенсивного (поточкового) обмена веществом и энергией с окружающей средой в неравновесных условиях может протекать процесс самоорганизации, приводящий систему в критическое состояние.

Согласно [Keilis-Borok, 2002] состояние сложных систем нельзя предсказать с абсолютной точностью. Однако холистический подход «от целого к деталям» в результате последовательных приближений позволяет найти решение для определения параметров готовящегося землетрясения с допустимой точностью.

Одним из основных параметров землетрясения является выделяемая энергия, выражаемая через магнитуду. Анализ физических процессов диссипации энергии в окружающей среде в областях подготовки сильных землетрясений показал, что количество тепловой энергии в форме скрытой теплоты, выделяемой в течение нескольких суток перед землетрясением, на порядок превосходит механическую энергию, выделяемую во время самого землетрясения [Ouzounov, 2021], рис. 1, что при холистическом подходе требует обязательного учёта явлений в атмосфере, имеющих место перед землетрясением. Предложенная физическая модель литосферно-атмосферно-ионосферного взаимодействия (LAIC) [Пулинец, 2015] позволила разработать алгоритмы краткосрочного прогноза сильных землетрясений, которые были опробованы в различных сейсмоактивных областях планеты и показали высокую эффективность.

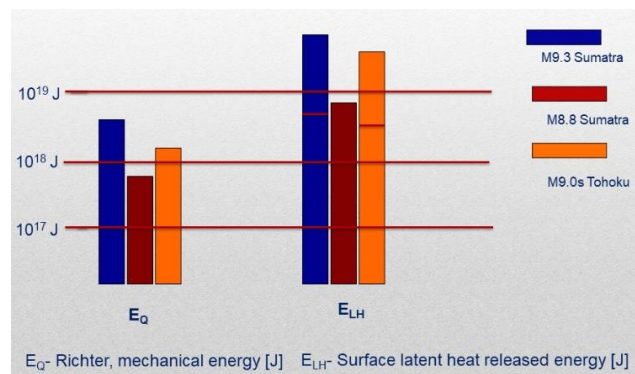


Рис. 1. Сравнение величин механической энергии E_Q землетрясений и тепловой энергии, выделяющейся в виде скрытой теплоты E_{LH} на финальной стадии подготовки землетрясений

Для определения области готовящегося землетрясения используется вероятностный подход [Богданов, 2017], основанный на следующей гипотезе: при подготовке крупного события в некотором объеме сейсмоактивного региона, находящегося в неустойчивом состоянии, происходит согласованное, коррелированное усиление сейсмической активности на уровне «фоновых», которая охватывает далекие от эпицентра будущего события области. «Фоновые» землетрясения происходят на больших пространственных масштабах и с приближением к моменту события имеют тенденцию группироваться приблизительно на глубине готовящегося основного события. Масштабы, определяющие временную τ и пространственную L корреляции, при формировании этих землетрясений составляют несколько лет для τ и сотни километров для L и зависят от магнитуды M готовящегося основного толчка. Далее в выделенной области проводится мониторинг краткосрочных предвестников с помощью метода когнитивной идентификации предвестников [Пулинец, 2021].

Литература

- Богданов В.В., Павлов А.В. Сейсмическое явление как процесс разрушения неустойчивой нелинейной структуры на примере Кроноцкого землетрясения 05 декабря 1997 г. // История науки и техники. 2017. № 8. С. 51–58.
- Пулинец С.А., Давиденко Д.В., Будников П.А. Метод когнитивной идентификации ионосферных предвестников землетрясений // Геомагн. Аэрон. 2021. Т. 61. С. 103–114.
- Пулинец С.А., Узунов Д.П., Карелин А.В., Давиденко Д.В. Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера-атмосфера-ионосфера-магнитосфера, стимулируемых ионизацией // Геомагнетизм и аэрномия. 2015. Т. 55. Вып. 4. С. 521–538.
- Keilis-Borok V. Earthquake Prediction: State-of-the-Art and Emerging Possibilities // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2002. V. 30. P. 1–33.
- Ouzounov D., Pulinets S., Liu J.Y. et al. The spatiotemporal evolution of atmospheric/ionospheric pre-earthquake anomalies in association with the preparation zone // Joint Scientific Assembly IAGA-IASPEI 2021, 21-27 August 2021, India.

МЕТОД АНАЛИЗА ООСЗ – ПРИЛОЖЕНИЯ К ПРОБЛЕМАМ ФИЗИКИ И ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Родкин М.В.^{1,2}

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

² *Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск,
Россия*

E-mail: rodkin@mitp.ru

(устный доклад)

Известно, что сейсмический режим крайне изменчив и незакономерен, случайная компонента маскирует систематическую компоненту режима. В результате по-прежнему остаются дискуссионными вопросы: действительно ли характерны для сейсмического режима те или иные его особенности, не является ли их выделение следствием некоего, пусть и не осознанного, подбора и подгонки данных? В частности, продолжает обсуждаться вопрос: существует ли в реальности форшоковый каскад или его выявление, как полагают ряд авторов, является результатом неосознанной подгонки данных?

Возможным решением таких вопросов является построение и анализ Обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ). В ООСЗ с масштабированием на размер очага главного события суммируются данные по большому числу (желательно, сотни, до тысячи) окрестностей отдельных сильных землетрясений. Анализ сейсмического режима в ООСЗ позволяет нивелировать обычно доминирующие индивидуальные особенности режима отдельных сильных землетрясений и выделить, с недоступными иными способами детальностью, типовые характерные особенности сейсмического процесса.

В частности, выявляется, что в ООСЗ явные признаки изменения фонового сейсмического режима, развитие форшокового степенного каскада и приближения времени Обобщенного сильного события (ОСЗ) могут наблюдаться, нарастая к моменту ОСЗ, примерно за 100 дней до момента ОСЗ. Отсюда, естественно, получаем, что задача «прогноза» ОСЗ почти тривиальна. Такой вывод имеет несомненное отношение к проблеме принципиальной возможности краткосрочного прогноза сильных землетрясений, но, возможно, не столь однозначно оптимистическое, как это может показаться. В плане аналогии можно сослаться на утверждение известного психолога В. Франкла (1990), который утверждает: «Среднестатистический человек – выдумка ученых, а не реальная личность. Он никак не может быть реальным человеком уже в силу своей предсказуемости». Не исключено, что проблема прогноза отдельного сильного землетрясения аналогичным образом не решается описанием поведения и прогнозом «среднестатистического сильного землетрясения». Почти несомненно при этом, что использование комплекса наблюдаемых в

ООСЗ аномалий может помочь получить более точный вариант прогноза, чем это возможно сейчас иными методами. Заметим, что иные новые твердо установленные прогнозные признаки могут быть инкорпорированы в комплекс аномалий, выявляемый в ООСЗ. Степень финальной точности такого прогноза, однако, в свете вышесказанного остается не ясной.

Кроме форшокового каскада в ООСЗ для широкого набора параметров (изменение средней магнитуды землетрясений, их средней глубины, средней продолжительности очагового процесса и ряда других) типичной оказывается нарастание амплитуды аномалии к моменту ОСЗ как минус логарифм времени до момента ОСЗ. Время развития этой аномалии в ООСЗ аналогично времени развития аномалии роста числа форшоков; начало роста аномалии имеет место примерно за 100 дней до момента ОСЗ. Представляется, что эта аномалия тесно связана с развитием форшокового степенного каскада числа событий, но природа этой связи на настоящий момент остается не вполне ясной.

Подчеркнем теперь тот важный момент, что большинство используемых в настоящее время прогнозных признаков и, в частности, большинство аномалий, выделяемых в ООСЗ, являются Неспецифическими. Эти признаки указывают на нарастание неустойчивости в исследуемой системе, но не конкретизируют механизм развития этой неустойчивости. Скажем, известный прогнозный признак уменьшения b -value может быть охарактеризован, фактически, как тавтология: «признаком роста опасности возникновения сильного землетрясения является рост доли более сильных событий». Такая неспецифичность позволяет переносить признаки развития неустойчивости сейсмического режима на другие области; в частности, они могут быть использованы в социологии и в политологии, как это было сделано в известных работах В.И. Кейлис-Борока, юбилей которого мы сейчас отмечаем.

В плане понимания физических механизмов развития сейсмической неустойчивости более полезными оказываются более «тонкие» признаки и особенности их проявления, специфические для данного механизма развития неустойчивости. В докладе сравниваются режимы ООСЗ для разных типов землетрясений, для горных ударов и для импульсов АЭ. К таким специфическим признакам относится, например, аномалия уменьшения средней глубины землетрясений. Эта аномалия выявляется не для всех типов землетрясений, что уже указывает на несхожесть их физических механизмов. Отметим также различие относительной выраженности фор- и афтершокового процесса в ООСЗ в сравнении с данными для горных ударов и для экспериментов по АЭ. Такие различия указывают на несхожесть физических механизмов как возникновения разноглубинных землетрясений, так и отличие механизмов развития землетрясений от горных ударов и от импульсов АЭ.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект № 19-05-00466.

PGVEM – МЕТОД НЕЗАВИСИМОЙ ОЦЕНКИ ДОЛГОСРОЧНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ПО ПОЛЕВЫМ ДАННЫМ?

Родкин М.В.^{1,2}, Корженков А.М.³, Николаева С.Б.⁴, Орунбаев С.Ж.⁵

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

² *Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск,
Россия*

³ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

⁴ *Геологический институт Кольского научного центра РАН, г. Апатиты,
Россия*

⁵ *Американский университет в Центральной Азии, г. Бишкек, Кыргызская
Республика*

E-mail: rodkin@mitp.ru

(устный доклад)

Оценки сейсмической опасности, представляемые в виде карт ОСР, рассчитываются обычно на основе инструментальных наблюдений и исторических данных (при наличии таковых). Однако период повторяемости сильнейших событий почти заведомо существенно превышает длительность сейсмологических наблюдений, а в большинстве случаев – и период регистрации исторических землетрясений. Отсюда актуально использование при построении карт ОСР палеосейсмических данных, характеризующих сейсмичность за большие интервалы времени. Классические методы палеосейсмологии связаны со вскрытием зон разломов и оценкой амплитуд и времен подвижек по этим разломам. Эти методы весьма трудоемки и потому не могут быть реализованы достаточно массово, чаще они проводятся уже после неожиданно произошедшего сильного землетрясения. Типичным примером является разрушительное Нефтегорское землетрясение (28 мая 1995 г., $M = 7.1$), район которого полагался слабосейсмичным, и только проведенные затем палеосейсмологические исследования показали, что подобные сильные землетрясения происходили в этом районе и ранее. Ввиду вышесказанного представляет интерес использования менее трудоемких методов оценки сейсмической опасности по палеоданным. Один из таких методов основан на оценке пиковых скоростей смещения грунта (величин PGV) при сильных исторических и палеоземлетрясениях (PGV estimation method, PGVEM).

Метод PGVEM основан на анализе статистической совокупности предположительно сейсмогенных смещений скальных отдельностей. Сначала отфильтровываются случаи, которые со значительной вероятностью могли быть вызваны несейсмогенными воздействиями. Для оставшихся случаев в рамках одной из предложенных механических моделей на основе законов сохранения оценивается вероятное значение пиковой скорости грунта (PGV), которое могло отвечать наблюдаемому смещению данной скальной отдельности, и азимут воздействия.

По результатам статистического анализа наблюдаемой совокупности получаемых значений азимутов воздействия и величин смещения и соответствующих им скоростей PGV

обычно получают набор пар данных: «азимут и характерная величина PGV». По этим данным определяются характерные значения, отвечающие центрам кластеров всех пар значений.

При наличии иных сведений, например расстояния до сейсмогенного разлома или до предполагаемой очаговой зоны, можно (используя предложенную в [Родкин, 2012] номограмму) оценить вероятную магнитуду землетрясения.

В случае отсутствия данных о вероятном очаге землетрясения можно по регрессионным соотношениям оценить максимальную интенсивность (балльность) для данной области. В этом случае важную роль играет то обстоятельство, что интенсивность более тесно корреляционно связана со значениями PGV, чем с пиковыми ускорениями PGA.

Первый подход чаще применяется для областей типа Кольского полуострова и Карелии, где современная сейсмичность достаточно слабая, но есть основания предполагать возникновение сильных землетрясений в предыдущие эпохи, в первую очередь в эпоху интенсивной дегляциации. Метод PGVEM дает в этом случае веские дополнительные аргументы в пользу реализации здесь сильных палеоземлетрясений. Но в данном случае трудно предполагать стационарность сейсмического режима.

Иная ситуация имеет место в областях активной современной сейсмичности, где нет оснований ожидать сильных изменений сейсмического режима во времени. В этом случае метод PGVEM может быть использован для уточнения долгосрочной сейсмической опасности. Такой подход был использован нами для Прииссыккуля, для долины р. Нарын в районе строительства Верхне-Нарынского каскада ГЭС и на западном участке Алайской долины. Во всех этих случаях применение PGVEM-метода дало оценки максимальной интенсивности несколько большие (в пределах полубалла или, реже, до балла), чем на принятой (полученной по инструментальным и отрывочным историческим данным) карте ОСР Киргизии. Учитывая различие соответствующих интервалов времени – менее сотни лет для данных, использованных при построении карт ОСР, и нескольких сотен лет и более по данным о смещениях скальных отделиностей – такое различие вполне ожидаемо. В ряде случаев применение метода PGVEM дает дополнительные указания по характеру сейсмичности в плане относительно большей или меньшей долгосрочной сейсмической опасности различных участков территории, а также относительной роли различных сейсмогенных структур и/или систем сеймотектонических напряжений.

В целом представляется возможным заключить, что метод PGVEM является эффективным и недорогим методом оценки долгосрочной сейсмической опасности.

Литература

Родкин М.В., Никонов А.А., Шварев С.В. Оценка величин сейсмических воздействий по нарушениям и смещениям в скальных массивах // Геодинамика и тектонофизика. 2012. V. 3. № 3. P. 203–237. DOI:10.5800/GT-2012-3-3-0072

ОПЫТ СРЕДНЕСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ОПАСНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЕ

Ружич В.В., Левина Е.А.

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

E-mail: Ruzhich@crust.irk.ru

(устный доклад)

Разработка методов среднесрочного прогноза землетрясений на территории Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) ведется с 1988 г. на основе обработки оперативных каталогов землетрясений, поступающих от БФ ФИЦ ЕГС РАН в г. Иркутске [<http://www.seis-bykl.ru>]. Мониторинг вариаций сейсмического режима ориентирован на среднесрочный прогноз умеренных и сильных очагов землетрясений с $K \geq 13$ с использованием геоинформационной системы «Prediction», основанной на методе распознавания образов. К числу наиболее значимых сейсмогеологических признаков распознавания очагов готовящихся опасных землетрясений в БРЗ относятся: наличие системы сейсмоактивных разломов и разломных узлов, сейсмических пятен в виде скопления эпицентров землетрясений, а также сейсмических брешей; возникновение нарастающей сейсмической активности на их периферии; появление значительных аномалий в значениях углов наклона графиков повторяемости землетрясений; возникновение длительного спада в режиме энерговыделения на отдельных участках сейсмоактивной области [Ружич, 1997]. Таким образом, выявляются базовые параметры прогноза: «место», «время» и «энергия». Для уточнения параметров «место» и «время» используются периодичности в сейсмическом режиме [Ружич, 1997, 2020; Любушин, 1998] и пространственно-временные диаграммы, позволяющие учитывать явление миграции землетрясений [Levina, 2015]. С 2001 года в МЧС от Института земной коры регулярно отправляются сводки об ожидаемых изменениях сейсмического режима БРЗ. Данные о прогнозе представляются в виде текстового сообщения и карт с указанием местоположения очагов ожидаемых землетрясений, представленными не точками эпицентров, а в виде площадей, ограниченных расчетной изосейстой 5 баллов [Левина, 2016], на которых прогнозируется распространение ощутимых сейсмических сотрясений. Со времени представления последней сводки для МЧС от 18.10.2019 г. до 12.01.2021 г. в БРЗ произошло 11 опасных событий с $K \geq 13$, из них в цель попали 9, а мимо цели – 2. Таким образом, положительный результат прогноза по параметру «место» составил 82% случаев. В более ранних прогностических сводках результаты составляли 67–71%. С целью изучения природных механизмов подготовки землетрясений авторами проведены натурные физические испытания в сегментах шероховатых плоскостей зон разломов [Кочарян, 2016; Ружич, 2014]. Таким способом получены данные о

геомеханических условиях возникновения предвестников в виде взаимосвязанных форшоковых активизаций и затиший перед главным ударом. Эти результаты подтверждены при анализе сейсмического режима подготовки землетрясений в БРЗ и некоторых других регионах. Для совершенствования методов многофакторного прогноза необходимы новые сведения о глубинных условиях подготовки землетрясений. Они могут быть получены при междисциплинарном подходе путем сейсмогеологического, геолого-геофизического и петрофизического изучения глубинных процессов в эксгумированных участках разломов, а также путем проведения натуральных экспериментов [Кочарян, 2016; Ружич, 2018; Byerlee, 1978].

Литература

- Кочарян Г.Г. Геомеханика землетрясений. М.: ГЕОС, 2016. 432 с.
- Левина Е.А. Оперативная оценка распределения степени сейсмической опасности средствами ГИС // Геоинформатика. 2016. № 1. С. 3–8.
- Любушин А.А., Писаренко В.Ф., Ружич В.В., Буддо В.Ю. Выделение периодичностей в сейсмическом режиме // Вулканология и сейсмология. 1998. № 1. С. 62–76.
- Ружич В.В. Сеймотектоническая деструкция в земной коре Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 144 с.
- Ружич В.В., Кочарян Г.Г., Савельева В.Б., Травин А.В. О формировании очагов землетрясений в разломах на приповерхностном и глубинном уровне земной коры. Часть II. Глубинный уровень // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 1039–1061. DOI:10.5800/GT-2018-9-3-0383
- Ружич В.В., Левина Е.А. Особенности распределения сейсмической активности в разных регионах Земли по фазам 11-летнего солнечного цикла // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6. № 1. С. 30–35. DOI:10.12737/szf-54201901
- Ружич В.В., Псахье С.Г., Черных Е.Н., Шилько Е.В., Левина Е.А., Пономарева Е.И. Физическое моделирование условий возникновения источников сейсмических колебаний при разрушении неровностей в зонах разломов // Физическая мезомеханика. 2014. Т. 17. № 3. С. 43–52.
- Byerlee J.D. Friction of rocks // Pure Appl. Geophys. 1978. V. 116. P. 615–626. DOI:10.5800/GT-2018-9-3
- Levina E.A., Ruzhich V.V. The seismicity migration study based on space-time diagrams // Geodynamics and Tectonophysics. 2015. V. 6. № 2. P. 225–240. DOI:10.5800/GT-2015-6-2-0178

НОВАЯ ТЕОРИЯ ЭКСПЛОЗИВНЫХ И ЭФФУЗИВНЫХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ

Сафронов А.Н.

Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, г. Москва, Россия

E-mail: safronov_2003@mail.ru

(стендовый доклад)

В этом исследовании мы разработали новые принципы происхождения explosивных и effузивных вулканических извержений. Новое объяснение механизмов извержений было сделано с использованием теории элементарной плавучести и новой K–Th–U структуры Земли, разработанной ранее автором [Safronov, 2016; 2020]. В ходе исследования effузивных извержений был дан ясный ответ на вопрос, почему легкие химические элементы, в основном соединения кремния и серы, в настоящее время преобладают в вулканическом пепле, газах и в лавах магмы. При исследовании взрывного механизма извержений было проанализировано 38 сильных извержений с индексом вулканической взрывоопасности (VEI) более 4+. Было показано, что существует связь между конфигурациями планет и извержениями вулканов. Установлено, что извержения вулканов происходили при разных типах линейного выравнивания планет. Оказалось, что указанное явление не зависит ни от массы планеты, ни от взаимного положения планет. Кроме этого, указанное явление не зависит от расстояния между планетами. Однако часто explosивные извержения наблюдались, когда расстояния между планетами были кратными друг другу. В работе было продемонстрировано, что выравнивание планет влияет не только на природные процессы на Земле, но и на Солнечную активность. Основываясь на исследованиях протуберанцев Солнца, был предложен новый механизм быстрого повышения давления под литосферными плитами Земли за счет генерации гравитационного вихря. По аналогии с солнечными протуберанцами такие гравитационные вихри, эпизодически генерируемые в слое верхней мантии, получили название земных магматических протуберанцев.

Литература

- Safronov A.N.* The Basic Principles of Creation of Habitable Planets around Stars in the Milky Way Galaxy // International Journal of Astronomy and Astrophysics. 2016. V. 6. P. 512–554. DOI:10.4236/ijaa.2016.64039
- Safronov A.N.* A New View of the Mass Extinctions and the Worldwide Floods // International Journal of Geosciences. 2020. V. 11. P. 251–287. DOI:10.4236/ijg.2020.114014

МАТЕРИАЛЫ ИНЖЕНЕРНО-СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ КАК ОСНОВА ДЛЯ МОНИТОРИНГА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Серебренников С.П., Джурик В.И., Ескин А.Ю.

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

E-mail: serebr@crust.irk.ru

(устный доклад)

Целью исследований является анализ геофизических и инженерно-геологических данных для территории Восточной Сибири с последующей возможностью прогнозировать уровень сейсмической опасности на объекты промышленного и гражданского назначения на стадии проектирования и строительства [Серебренников, 2020]. Необходимость исследований обусловлена широким диапазоном изменения уровня сейсмической опасности для региона. В пределах исследуемой территории она изменяется от 6 до 10 баллов [ОСР-2015]. Исходными данными для этого исследования послужили материалы инструментальных сейсморазведочных измерений на территориях инфраструктурных комплексов на территории региона. Авторами рассмотрена возможность прогнозирования влияния приповерхностной зоны геологического разреза на уровень проявления сейсмической опасности отдельных групп рыхлых и скальных образований, вероятность их трансформаций, которая базируется на изучении основных параметров геофизических полей непосредственно на территории расположения объектов и региона в целом. Исходные данные для обоснования инженерно-сейсмологических условий и влияния комплекса грунтов на основные параметры сейсмических воздействий на возводимые сооружения представлены на участках строительства, охватывающих весь спектр инженерно-геологических условий: от талых грунтов до районов распространения вечномерзлых [Геологическая карта СССР, 1996; Джурик, 2017]. По материалам экспериментальных методов получены все необходимые сведения о состоянии и мощности рыхлых отложений, основных сейсмических параметрах грунтов, скоростях распространения в них сейсмических волн. В итоге зафиксированные результаты геофизических исследований, выполненные на участках строительства, для создания обобщенной базы основных инженерно-сейсмологических параметров дают возможность прогнозирования на этапе оценки уровня сейсмической опасности для промышленных и гражданских объектов.

При использовании отмеченных данных и реализации расчетных методов дана оценка сейсмической опасности ответственных сооружений в параметрах сейсмических воздействий для промышленных и гражданских объектов во всем разнообразии климатических условий территории Восточной Сибири.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ и МОКНСМ в рамках научного проекта № 20-55-44011.

Литература

- Геокриологическая карта СССР (под ред. А.Ю. Рогатюк): Масштаб 1:2500000, Лист 11, МГУ им. М.В. Ломоносова. 1996.
- Джурик В.И., Серебренников С.П., Брыжак Е.В., Ескин А.Ю.* Оценка и прогноз поведения грунтов различного состояния при сильных землетрясениях в пределах криолитозоны Восточной Сибири // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 6. С. 78–79.
- ОСР-2015. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Изменение № 1 СП 14.13330.2014 Строительство в сейсмических районах СНиП II-7-81* (актуализированного СНиП II-7-81* «Строительство в сейсмических районах» (СП 14.13330.2011). Дата введения в действие 2015-12-01 приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 23 ноября 2015 г.
- Серебренников С.П., Джурик В.И., Брыжак Е.В.* Возможности геофизических методов при расчете уровня сейсмической опасности крупных инфраструктурных объектов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2020. № 5. С. 32–53.

О СВЯЗИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЧАГА НА ПРИМЕРЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА

Скоркина А.А.^{1,2,3}

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

E-mail: anna@mitp.ru

(устный доклад)

В настоящее время для протяженного очага традиционной моделью является плоский сдвиговый разрыв [Аки, 1983]. Он описывается вектором подвижки, или дислокации, $D(t)$. Этот протяженный очаг на расстояниях, существенно превышающих его размер, может быть описан через эквивалентный точечный дипольный силовой источник ([Кейлис-Борок, 1957] и др.), характеризуемый тензором сейсмического момента.

Такой эквивалентный точечный источник имеет функцию:

$$M_0^*(t) = \mu \int D^*(t) dS,$$

где μ – модуль сдвига, S – площадь очага, а точка обозначает дифференцирование по времени t . Ее спектр Фурье,

$$\Omega(\omega) = \int e^{-i\omega t} M_0(t) dt,$$

соответственно. Следовательно,

$$\int M_0(t) dt = M_0, \quad \text{а}$$

$$\Omega(\omega = 0) = M_0,$$

где значение M_0 – это скаляр, отражающий конечный этап развития разрыва.

Определение сейсмического момента M_0 (одной из энергетических характеристик очага землетрясения) возможно с использованием в качестве исходных данных спектров объемных волн. Такая процедура описана, например, в [Hanks, 1972] и других работах, определяющих M_0 через амплитуду очагового спектра смещений на нулевой частоте (Ω_0), следуя [Кейлис-Борок, 1957].

Применение спектрального анализа к акселерограммам умеренных камчатских землетрясений (> 4000 спектров от > 600 землетрясений с $M_w = 3-6$) демонстрирует такой подход [Абубакиров, 2018; Skorkina, 2020]. Полученный для Дальневосточного региона набор оценок моментных магнитуд M_w позволил обнаружить наличие небольшого (0.1–0.2), но систематического занижения среднечастотных оценок M_w , полученным по объемным волнам, в сравнении с низкочастотными оценками M_w (по поверхностным волнам), что поднимает вопрос о необходимости определения разрешающих способностей тех или иных

методов определения энергетических характеристик землетрясений в разных диапазонах магнитуд (и частот, соответственно).

Исследование частично выполнено за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект №20-05-00433) в Институте теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН.

Литература

- Абубакиров И.Р., Гусев А.А., Гусева Е.М., Павлов В.М., Скоркина А.А.* Массовое определение моментных магнитуд M_w и установление связи между M_w и M_L для умеренных и слабых камчатских землетрясений // *Физика Земли*. 2018. № 1. С. 158–172.
- Аки К., Ричардс П.* Количественная сейсмология. Теория и методы. Т. 1. М.: Мир, 1983. 519 с.
- Кейлис-Борок В.И.* К теории волн, возникающих при сдвиге // *Изв. АН СССР, сер. геофиз.* 1957. № 4.
- Hanks T.C., Wyss M.* The use of body-wave spectra in the determination of seismic-source parameters // *BSSA*. 1972. V. 62. № 2. P. 561–589.
- Skorkina A.A.* Scaling of two corner frequencies of source spectra for earthquakes of the Bering fault // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2020. V. 20. № 2. Article ES2001.

ПОЧЕМУ СЦЕНАРНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ЯВЛЯЮТСЯ НЕОБХОДИМЫМ КОМПОНЕНТОМ РАБОТ ПО ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО РИСКА

Скоркина А.А.^{1,2,3}, Хажаев Р.Р.^{3,1}

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

E-mail: anna@mitp.ru

(стендовый доклад)

Исходной информацией при определении сейсмической опасности (с точки зрения прогноза сейсмических воздействий) для того или иного региона РФ является карта общего сейсмического районирования (например, ОСР-97) как вероятностный прогноз колебаний грунта с заданной повторяемостью.

Однако такой вероятностный подход к оценке сейсмической опасности применим в случаях, когда описание потенциальной опасности возможно с помощью ограниченного количества параметров. Для ответственных объектов необходимо учитывать большее количество параметров сейсмичности (протяженность очага, направленность излучения, тип грунта и др.), и в этих случаях на первый план выходят методы, основанные на детерминистическом описании опасности, через описание серии конкретных возможных землетрясений, так называемых сценарных землетрясений. Такой подход рассматривался ранее, например, для территории Петропавловска-Камчатского [Гусев, 2005].

Сибирский федеральный округ (и, в частности, г. Иркутск) также отличается ощутимой сейсмичностью. Прогнозные оценки максимальных магнитуд для трех условных подрегионов составляют 7.82, 8.39 и 8.41 соответственно [Ружич, 1998]. При этом значительно варьируются и наблюдаемые механизмы очагов землетрясений [Мишарина, 1972; Солоненко, 1993].

Предварительное моделирование акселерограмм, без учета нелинейных эффектов, для трех сценарных землетрясений вблизи г. Иркутск (с $M = 7.5, 8$ и 8.5) показывают сопоставимый балл ($I = 8.1$) непосредственно для территории города (несмотря на разницу в магнитуде), что, в том числе, связано с учетом эффекта протяженности очага.

Исследование частично выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №20-17-00180) в Институте теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН.

Литература

Гусев А.А., Шумилина Л.С., Акатова К.Н. Об оценке сейсмической опасности для города Петропавловска-Камчатского на основе набора сценарных землетрясений // Вестник ОНЗ РАН: электрон. науч.-информ. журн. 2005. № 1. С. 23.

- Мишарина Л.А.* Напряжения в очагах землетрясений Монголо-Байкальской зоны / Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. М.: Наука, 1972. С. 161–171.
- Ружич В.В., Левина Е.А., Писаренко В.Ф., Любушин А.А.* Статистическая оценка максимальной возможной магнитуды землетрясения для Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 10. С. 1443–1455.
- Солоненко А.В., Солоненко Н.В., Мельникова В.И., Козьмин Б.М., Кучай О.А., Суханова С.С.* Напряжения и подвижки в очагах землетрясений Сибири и Монголии // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. 1993. С. 113–122.

**АКАДЕМИК В.И. КЕЙЛИС-БОРОК (1921–2013) – 70 ЛЕТ НА ПЕРЕДНЕМ КРАЕ
НАУКИ**

Соловьев А.А.

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

E-mail: soloviev@mitp.ru

(устный доклад)

Доклад содержит обзор исследований, выполненных академиком В.И. Кейлис-Бороком за 70 лет его научной деятельности с 1943 по 2013 год. Среди них: работы по прямым и обратным задачам сейсмологии, заложившие основы нового фундаментального направления в геофизике – вычислительной сейсмологии; разработка нового широкого понимания проблемы сейсмического риска, что включает экономические оценки риска, поиск потенциальных мест сильнейших сейсмических событий и прогноз землетрясений; новый подход к динамической задаче прогноза землетрясений, состоящий в совместном анализе комплекса характеристик отдельных фаз процесса подготовки сильного события, что позволило создать строго формализованные алгоритмы среднесрочного прогноза землетрясений; разработка концепции литосферы как нелинейной динамической системы и исследования в области общей теории и методологии прогноза критических явлений в нелинейных системах, результаты которых оказались плодотворными не только для понимания проблемы прогноза землетрясений, но и для разработки алгоритмов прогноза критических явлений в сложных социоэкономических системах.

Доклад подготовлен при поддержке грантов РФФИ №№ 20-05-00171 и 20-55-18008.

К ОЦЕНКЕ M_{\max} СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩИХ ЗОН

Стром А.Л.^{1,2}, Перетокин С.А.^{1,3}, Зеленин Е.А.^{1,4}, Гайдаленок О.В.^{1,4}

¹ ООО «Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве»,
г. Москва, Россия

² ООО «Центр геодинамических исследований», г. Москва, Россия

³ Институт физики земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

⁴ Геологический институт РАН, г. Москва, Россия

E-mail: strom.alexandr@yandex.ru

(устный доклад)

Одной из важных задач при проведении как общего, так и детального сейсмического районирования, а также работ по уточнению исходной сейсмичности площадок сооружений повышенного уровня ответственности является оценка максимальных магнитуд землетрясений (M_{\max}), ожидаемых в выделенных сейсмогенерирующих зонах (зонах ВОЗ) как линейных (сейсмолинеаментах или зонах активных разломов), так и площадных – сейсмодоменах. При составлении карт ОСР-97, а позднее и ОСР-2016, каждой из выделенных зон ВОЗ присваивалось определенное фиксированное значение M_{\max} с шагом 0.5 единицы M и с точностью ± 0.2 [Уломов, 1999]. Возникает, однако, вопрос, всегда ли такое решение обосновано и оправдано. Так, при определении M_{\max} линейных зон ВОЗ, с которыми, согласно методологии, использованной при составлении карт ОСР, связаны землетрясения с $M_{\max} \geq 6.0 \pm 0.2$, возможны 3 алгоритма действий.

Первый применим для зон разломов, с которыми связаны очаги крупных землетрясений с известной магнитудой ($M_{\text{набл}}$) (например, Хангайский разлом). Здесь M_{\max} не может быть меньше магнитуды максимального зарегистрированного события ($M_{\max} \geq M_{\text{набл}}$). Сверху же значение M_{\max} , в целом, ограничено протяженностью линейной зоны ВОЗ, так как магнитуда пропорциональна длине очага [Wells, 1994].

При оценке M_{\max} разломов, вдоль которых уверенно выявлены сеймотектонические дислокации – следы молодых подвижек по разломам (Главный Саянский, Улахан, Центрально-Сахалинский), для того чтобы в дальнейшем действовать по варианту 1, необходимо оценить магнитуду землетрясений, для которых нет ни исторических, ни, тем более, инструментальных сведений. Она может быть определена по эмпирическим соотношениям между (а) длиной разрыва и магнитудой ($M \div L$) и (б) величиной одноактной подвижки (максимальной или средней) и магнитудой ($M \div D_{\max}$; $M \div D_{\text{av}}$). Для того чтобы и проследить древнюю подвижку по простиранию на всю ее длину, и определить максимальное единовременное смещение, требуется изучить весь разлом в траншеях с датированием подвижек. При этом у эмпирических соотношений ($M \div D_{\max}$) огромный разброс. Нужно также убедиться, что выявленная однократная подвижка действительно

максимальная. На основании единичных измерений амплитуды можно лишь утверждать, что магнитуа землетрясения была не меньше величины, определенной по огибающим на соответствующих графиках. И, далее, корректировать эту оценку с учетом протяженности разрыва, принимая ее как минимально возможное значение M_{\max} . Оценка сверху – опять же по протяженности разлома.

Наконец, есть разломы, по которым достоверно выявленные подвижки неизвестны, хотя их протяженность достаточна, чтобы вместить очаг значительной магнитуды (Кузнецкий разлом). Надежность и обоснованность оценки их M_{\max} еще меньше.

У площадных зон ВОЗ – сейсмодоменов, для которых при ОСР сейсмический потенциал ограничен значениями $M_{\max} \leq 5.5 \pm 0.2$, и их выделение и оценка M_{\max} тесно взаимосвязаны. Из-за низких значений магнитуд сейсмологическая информация, применяемая при анализе этих зон ВОЗ, – это практически исключительно данные об инструментально зарегистрированных землетрясениях, в редких случаях дополняемая макросейсмическими данными. Структурная приуроченность очагов таких землетрясений чаще всего неизвестна. Поэтому выделение объемов земной коры, более или менее однородных в сейсмологическом отношении, должно базироваться на пространственном распространении именно гипоцентров землетрясений малых магнитуд. Очевидно, что приписываемое сейсмодомену значение M_{\max} не может быть меньше максимальной магнитуды события, зарегистрированной на территории, относимой к этому домену. Сверху же эту величину целесообразно ограничить максимальным значением, принимаемым для рассеянной (доменной) сейсмичности ($M_{\max} = 5.5 \pm 0.2$), так как срок наблюдений очень мал.

В условиях столь высокой неопределенности целесообразно дополнить логическое дерево, применяемое при вероятностной оценке сейсмической опасности, ветвями, позволяющими учитывать различные оценки M_{\max} , получаемые вышеописанными способами на основании имеющейся информации. Веса, присваиваемые тому или иному варианту, неизбежно субъективны, но при достаточно представительной экспертной группе это, на наш взгляд, позволит снизить субъективность при оценке сейсмической опасности.

Литература

- Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации-ОСР-97. Масштаб 1:8000000 // Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ, 1999. 57 с.
- Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bull. Seism. Soc. Am. 1994. V. 84. P. 974–1002.

О РАЗДЕЛЕНИИ МАСШТАБОВ В ЗАДАЧЕ О КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Чертовских Р.А.^{1,2}, Желиговский В.А.²

¹ *Исследовательский центр систем и технологий, Инженерный факультет
Университета Порто, г. Порто, Португалия*

² *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики
РАН, г. Москва, Россия*

E-mail: roman@mitp.ru

(устный доклад)

Геомагнитное поле Земли генерируется течением электропроводящей жидкости во внешнем ядре нашей планеты и изучается в рамках теории гидромагнитного динамо [Моффатт, 1980]. Большой интерес представляют детали эволюции крупномасштабного магнитного поля – например, магнитные инверсии. В теории электродинамики средних полей [Краузе, 1984] и теории магнитогидродинамической (МГД) устойчивости к крупномасштабным возмущениям [Dubrulle, 1991; Lanotte, 1999; Zheligovsky, 2011] разработаны описания динамики крупномасштабных магнитных полей. Оба подхода предполагают разделение пространственных масштабов, т. е. постулируют, что в рассматриваемой МГД системе присутствуют два существенно различных пространственных масштаба, короткий и длинный. Мы исследуем вопрос о корректности предположения о наличии такого разделения масштабов в системе, где разрешено произвольное соотношение масштабов.

Рассмотрена задача о кинематической генерации магнитного поля заданным стационарным течением несжимаемой жидкости. Для 2π -периодического по всем трем пространственным переменным течения мы изучаем магнитные моды, амплитудно модулированные гармоникой Фурье с произвольным волновым вектором \mathbf{q} . При заданном \mathbf{q} динамика магнитного поля определяется доминирующей магнитной модой – собственной функцией оператора магнитной индукции, отвечающей собственному значению с максимальной действительной частью. Эту задачу на собственные значения решаем в торе $[0; 2\pi]^3$. Выведено аналитическое выражение для производных инкремента по компонентам \mathbf{q}_k , и для вычисления доминирующих мод применен метод градиентного спуска.

Максимальные инкременты роста магнитного поля и соответствующие им волновые векторы \mathbf{q} вычислены для коэффициента молекулярной диффузии в интервале $[0.03; 0.3]$ для трех стационарных течений жидкости. Их поля скорости имеют псевдослучайные коэффициенты Фурье и спроецированы на пространство соленоидальных функций с нулевым пространственным средним. После нормировки энергетического спектра они имеют экспоненциальный (I) или колмогоровский (II) энергетический спектр, или малое число

ненулевых коэффициентов Фурье в старших сферических слоях (III), моделируя течения, относящиеся к вязкому (I) или инерциальному (II) участку спектра турбулентного течения, или представляющие собой его крупномасштабную часть (III).

Расчеты показали, что для всех трех полей существенное разделение масштабов (т. е. малая величина $|\mathbf{q}|$ для магнитной моды с максимальным инкрементом) наблюдается только при больших значениях коэффициента магнитной диффузии, т. е. в пределе, не представляющем интерес для гео- или астрофизики. При малых молекулярных магнитных диффузиях доминирующим модам отвечает $|\mathbf{q}| \geq 0.5$, т.е. генерируемое магнитное поле содержит промежуточный «длинный» масштаб, несущественно (менее, чем вдвое) превосходящий «короткий» масштаб течения жидкости. Эти результаты совпадают с результатами, полученными в [Желиговский, 2020], где было рассмотрено только течение вида (I). Указанное свойство доминирующих магнитных мод приводит к выводу, что магнитные моды, появляющиеся при действии таких механизмов, как α -эффект и турбулентная диффузия, не видны на фоне гораздо более быстрорастущих доминирующих мод. (При этом концепции α -эффекта и турбулентной диффузии, возможно, остаются физически непротиворечивыми, когда эти механизмы возникают не в силу разделения пространственно-временных масштабов, а при осреднении турбулентных структур по ансамблю.)

Литература

- Желиговский В.А., Чертовских Р.А.* О кинематической генерации магнитных мод блоховского типа // Физика Земли. 2020. № 1. С. 118–132.
- Краузе Ф., Рэдлер К.Х.* Магнитная гидродинамика средних полей и теория динамо. М.: Мир, 1984.
- Моффат Г.* Возбуждение магнитного поля в проводящей среде. М.: Мир, 1980.
- Dubrulle B., Frisch U.* Eddy viscosity of parity-invariant flow // Phys. Rev. A. 1991. V. 43. P. 5355–5364.
- Lanotte A., Noullez A., Vergassola M., Wirth A.* Large-scale dynamo by negative magnetic eddy diffusivities // Geophys. Astrophys. Fluid Dyn. 1999. V. 91. P. 131–146.
- Zheligovsky V.A.* Large-scale perturbations of magnetohydrodynamic regimes: linear and weakly nonlinear stability theory // Lecture Notes in Physics. V. 829. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. DOI:10.1007/978-3-642-18170-2_1

ОЦЕНКИ СОБОЛЕВСКИХ НОРМ ВТОРЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ПО ВРЕМЕНИ РЕШЕНИЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ДИФФУЗИОННОЙ МАГНИТОГИДРОДИНАМИКИ

Чураков Е.М.

Российский государственный университет нефти и газа (НИУ)
имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия

E-mail: churakov_2000@list.ru

(устный доклад)

Получена интегральная оценка соболевских норм вторых производных по времени пространственно-периодических трехмерных решений уравнений диффузионной магнитогидродинамики следующего вида:

$$\int_{t_0}^T \left(\left\| \frac{d^2 \mathbf{V}}{dt^2} \right\|_s^2 + \left\| \frac{d^2 \mathbf{B}}{dt^2} \right\|_s^2 \right)^{\frac{\alpha_s + 4}{2}} dx < \infty,$$

где $s \geq -1/2$ и $\alpha_s = 2/(2s-1)$.

Доказательство опирается на аналогичные оценки для самих решений и их первых производных, приведенные в [Zheligovsky, 2021].

Литература

Zheligovsky V. Space analyticity and bounds for derivatives of solutions to the evolutionary equations of diffusive magnetohydrodynamics // Mathematics. 2021. V. 9. Article 1789. DOI:10.3390/math9151789

SOURCE PARAMETERS OF THE SEPTEMBER 21, 2020 MW 5.6 BYSTRAYA EARTHQUAKE AT THE SOUTH-WESTERN FLANK OF THE BAIKAL RIFT

Filippova A.I.^{1,2}, Bukchin B.G.², Fomochkina A.S.^{3,2}

¹ Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Moscow, Troitsk, Russia

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

³ Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russia

E-mail: aleirk@mail.ru

(oral)

We study the M_w 5.6 Bystraya earthquake, occurred on September 21, 2020 at the SW flank of the Baikal rift zone in the area, where only few small seismic events have been detected during the whole period of instrumental observations (since 1950). Source parameters of the study seismic event and its largest aftershock (M_w 4.7) are inverted from intermediate-period amplitude spectra of surface waves. Hypocentral depths and seismic moment tensors in a double-couple approximation are calculated for both earthquakes using the procedure described in [Bukchin, 1990; Lasserre, 2001], while integral source characteristics, describing its spatio-temporal development, are estimated only for the mainshock applying the method by B.G. Bukchin [Bukchin, 1995]. For the Bystraya earthquake, directivity effects (rupture direction and velocity) are studied for the first time for the whole Baikal rift.

The obtained results show that the Bystraya seismic event can be associated with activation of the SE segment of the Main Sayan fault, which is one of the largest faults in the south of Eastern Siberia. It stretches approximately 1000 km northwest from the southern tip of the Lake Baikal basin and is usually regarded as a structural boundary between the Siberian Platform and the Sayan-Baikal fold belt [Solonenko, 1977]. The sources of the mainshock and its largest aftershock are formed under the influence of the NW-SE extension and NE-SW compression. The predominance of left-lateral strike-slip motions agrees well with previous studies at the SW flank of the Baikal rift [Lukhnev, 2010; Mel'nikova, 2007; Ritz, 2018]. A small thrust component, observed in the earthquake sources, can reflect the inversion uplift of some blocks of the Bystraya basin bottom as well as the Bystrinskaya Sopka massif, which has been previously revealed only in geomorphological studies [Shchetnikov, 2016; 2017]. The dipping of the earthquake rupture plane evidences for flattening of the considered fault segment at some depth or for the existence of differently oriented structural discontinuities inside the fault zone of a finite width. The long rupture of the Bystraya earthquake could be connected with its almost pure strike-slip focal mechanism and orientation of the rupture plane approximately along the Main Sayan fault strike. Relatively slow subshear rupture velocity of the considered seismic event could indicate significant energy

dissipation near the rupture front, for example, due to generating plastic deformations around the primary fault zone.

The obtained results partly fill the gap in seismological studies for the SE segment of the Main Sayan fault, which has been relatively quiet for a long time. The calculated parameters, including ones accounting for a finite source and directivity effects, are of great value for further seismic hazard assessments of the considered territory.

References

- Bukchin B.G.* Determination of source parameters from surface wave recording allowing for uncertainties in the properties of medium // *Izvestiya Akad. Nauk SSSR. Fizika Zemli*. 1990. № 25. P. 723–728.
- Bukchin B.* Determination of stress glut moments of total degree 2 from teleseismic surface wave amplitude spectra // *Tectonophysics*. 1995. V. 248. № 3. P. 185–191. DOI:10.1016/0040-1951(94)00271-A
- Lasserre C., Bukchin B., Bernard P., Tapponier P., Gaudemer Y., Mostinsky A., Dailu R.* Source parameters and tectonic origin of the 1996 June 1 Tianzhu ($M_w=5.2$) and 1995 July 21 Yongen ($M_w=5.6$) earthquakes near the Haiyuan fault (Gansu, China) // *Geophysical Journal International*. 2001. V. 144. P. 206–220. DOI:10.1046/J.1365-246X.2001.00313.X
- Lukhnev A.V., San'kov V.A., Miroschnichenko A.I., Ashurkov S.V., Calais E.* GPS rotation and strain rates in the Baikal-Mongolia region // *Russian Geology and Geophysics*. 2010. V. 51. P. 785–793. DOI:10.1016/j.rgg.2010.06.006
- Mel'nikova V.I., Radziminovich N.A.* Parameters of seismotectonic deformations of the Earth's crust in the Baikal rift zone based on seismological data // *Doklady Earth Sciences*. 2007. V. 416. P. 1137–1139. DOI:10.1134/S1028334X07070355
- Ritz J.-F., Arzhannikova A., Vassallo R., Arzhannikov S., Larroque C., Michelot J.-L., Massault M.* Characterizing the present-day activity of the Tunka and Sayan faults within their relay zone (western Baikal rift system, Russia) // *Tectonics*. 2018. V. 37. P. 1376–1392. DOI:10.1002/2017TC004691
- Shchetnikov A.* Morphotectonics of the Tunka rift and its bordering mountains in the Baikal rift system, Russia // *Geomorphology*. 2016. V. 273. P. 258–268. DOI:10.1016/j.geomorph.2016.08.019
- Shchetnikov A.A.* Morphotectonic inversion in the Tunka rift basin (southwestern Baikal region) // *Russian Geology and Geophysics*. 2017. V. 58. № 7. P. 778–786. DOI:10.1016/j.rgg.2016.10.014
- Solonenko V.P.* (Ed.) *Seismic Zoning of East Siberia and Its Geological-Geophysical Bases*. Novosibirsk: Nauka, 1977. 317 p. (in Russian)

MODERN GEODYNAMICS OF THE EASTERN PART OF THE ALPINE-HIMALAYAN FOLDING BELT ACCORDING TO GPS OBSERVATIONS

Kazimov I.E., Kazimova S.E.

Republican Seismic Survey Center of ANAS, Baku, Azerbaijan

E-mail: sabina.k@mail.ru

(oral)

The purpose of these studies was a comparative analysis of the modern geodynamics of the eastern part of the Alpine-Himalayan fold belt, including the Eastern Mediterranean, the Caucasian and Iranian blocks. The Alpine-Himalayan fold belt stretches for many thousands of kilometers from the Atlantic to the Pacific Ocean. At this convergent boundary, the Eurasian, Indian, Arabian and African lithospheric plates are currently in contact, characterized by complex tectonic activity, such as volcanic eruptions, mountain building and earthquakes [McKenzie, 1970; 1972; 1978]. Eastern Anatolia, the Caucasus and Bitlis-Zagros are zones of active continental collision due to modern tectonic conditions [McClusky, 2000; 2003].

The results of GPS measurements obtained in recent years, including on the territory of Azerbaijan, once again convincingly indicated the importance of the horizontal component of tectonic movements in the development of the earth's crust and the entire lithosphere [Reilinger, 1997]. With the help of global satellite geodesy, it became possible not only to obtain high-quality information about modern geodynamics, but also to quickly monitor all its spatio-temporal changes, which is especially important for the purposes of adequate seismic zoning and long-term forecasting of strong earthquakes.

Analysis of the velocity field of GPS stations showed the heterogeneity of deformation processes in the region of the Eastern Mediterranean and the Caucasus. The considered results show the movement of the Arabian plate relative to the Eurasian one. Considering the speeds of movement of the Anatolian and Eurasian plates, and the Arabian and Anatolian plates, it was found that the shear rate along the North Anatolian fault was 20 mm/year, along the East Anatolian – 14 mm/year. This indicates the convergence of the Anatolian and Eurasian plates through the system of right strike-slip faults in eastern Turkey and the Thrust system in the Caucasus. The total reduction in the distance between the Lesser and Greater Caucasus is 10 mm/year.

In the Central Iranian bloc and the Caucasian bloc, movement was noted clockwise with an azimuth rotation from 350 to 90 degrees. The tectonics of Iran is dominated by the collision of the Arabian and Eurasian plates. The speed of movement of the plates was estimated at 22 mm/year. During these movements, the Zagros crust is shortened by about 9 ± 2 mm/year in the north-south direction. According to modern data from GPS measurements, Western Zagros at a speed of $\sim 10 \pm 2$ mm/year in the direction of $12 \pm 8^\circ$ north-northwest. An analysis of the mechanisms of

earthquake focal points showed that faults predominate in the western part of Turkey, strike-slip faults in the central part, and a small part in the NE of the country is characterized by reverse faults. Along the fold-thrust belt of the Zagros, mechanisms of earthquake sources are observed in the form of thrust faults (reverse faults) and reverse faults. In northern Iran, near the Elburz Mountains, there are numerous strike-slip faults and left-side strike-slip faults located south of the Caspian Sea. The territory of the Caucasus region is characterized by upthrust-thrusts.

Distribution of the stress coefficient (Lode–Nadai) of the Mediterranean region according to the earthquake source mechanism for the period 2005–2021 showed the predominance of compression deformations within the Arabian plate, the Iranian block, the Caucasus region, and the northern part of the Anatolian microplate. Stretching is predominantly dominant in the southern and western Anatolian plate.

References

- McClusky S., Balassanian S., Barka A., et al.* Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2000. V. 105. P. 5695–5719.
- McClusky S., Reilinger R., Mahmoud S., Ben Sari D., Tealeb A.* GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions // *Geophys. J. Int.* 2003. V. 155. P. 126–138.
- McKenzie D.* Active tectonics of the Mediterranean region // *Geophys. J. Int.* 1972. V. 30. P. 109–185.
- McKenzie D.* Active tectonics of the Alpine–Himalayan belt: the Aegean Sea and surrounding regions // *Geophys. J. Int.* 1978. V. 55. P. 217–254.
- McKenzie D.P.* Plate tectonics of the Mediterranean region // *Nature*. 1970. V. 226. P. 239–243.
- Reilinger R.E., McClusky S.C., Oral M.B., King R.W., Toksoz M.N., Barka A.A., Kinik I., Lenk O., Sanli I.* Global Positioning System measurements of present-day crustal movements in the Arabia-Africa-Eurasia plate collision zone // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 1997. V. 102. P. 9983–9999.

IMPACT OF TYPHOON GAY ON LITHOSPHERIC EARTHQUAKES

Kostin V.M., Belyaev G.G., Ovcharenko O.Ya., Trushkina E.P.

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave
Propagation RAS, Moscow, Russian Federation*

E-mail: kostin@izmiran.ru

(oral)

Analysis of long-wave data from US seismic stations from 2006 to 2015 revealed 14,077 discrete impulse sources with a magnitude of $M_w \sim 3.6$ [Fan, 2019]. Signals were recorded from the area of tropical cyclones (TCs) as they passed the continental shelves. The duration of action ranged from several hours to several days.

Analysis of the strongest earthquakes $M_w > 6.1$ over the past 30 years near the San Andreas fault showed that they are interrelated with the development of TCs [Kostin, 2020]. In this case, earthquakes to the west of the fault do not have foreshocks and earthquakes to the east have foreshocks. The place and time of the earthquakes could be predicted. In particular, the Landers 1992 earthquake is associated with the development of Hurricane Celia.

The development of a chain of 11 TCs in September 1992 after underground nuclear tests (UNT) in Nevada caused a series of non-foreshock lithospheric small plate earthquakes $h > 20$ km. The South Sandwich Islands region [Kostin, 2019] and the Burma Plate [Kostin, 2019a] were especially prominent. The article shows that the Dec-25-2004 earthquake and subsequent tsunami were associated with TC Chambo in the central South Indian Ocean.

In another work [Kostin, 2020a] it is shown that after the French UNTs in November 1990, there was a synchronous development of 3 super typhoons of the 5th category. At this time, more than 30 lithospheric non-foreshock earthquakes $M_w > 4.9$ occurred along the southwestern boundary of the ring of fire.

This paper considers the development of the strongest super typhoon Gay in 35 years and the appearance of accompanying global lithospheric earthquakes. Figure shows the intensity of TCs and the logarithm of energy from lithospheric earthquakes released per day on various faults.

The relationship between the energy of earthquakes and the intensity of TCs is clearly observed.

On November 21, the day of the typhoon Gay maximum, four non-foreshock lithospheric earthquakes occurred along the arc from the Central Mediterranean Sea, Greece, $M_w = 5.9$ to Sandwich Plate $M_w = 6.6$.

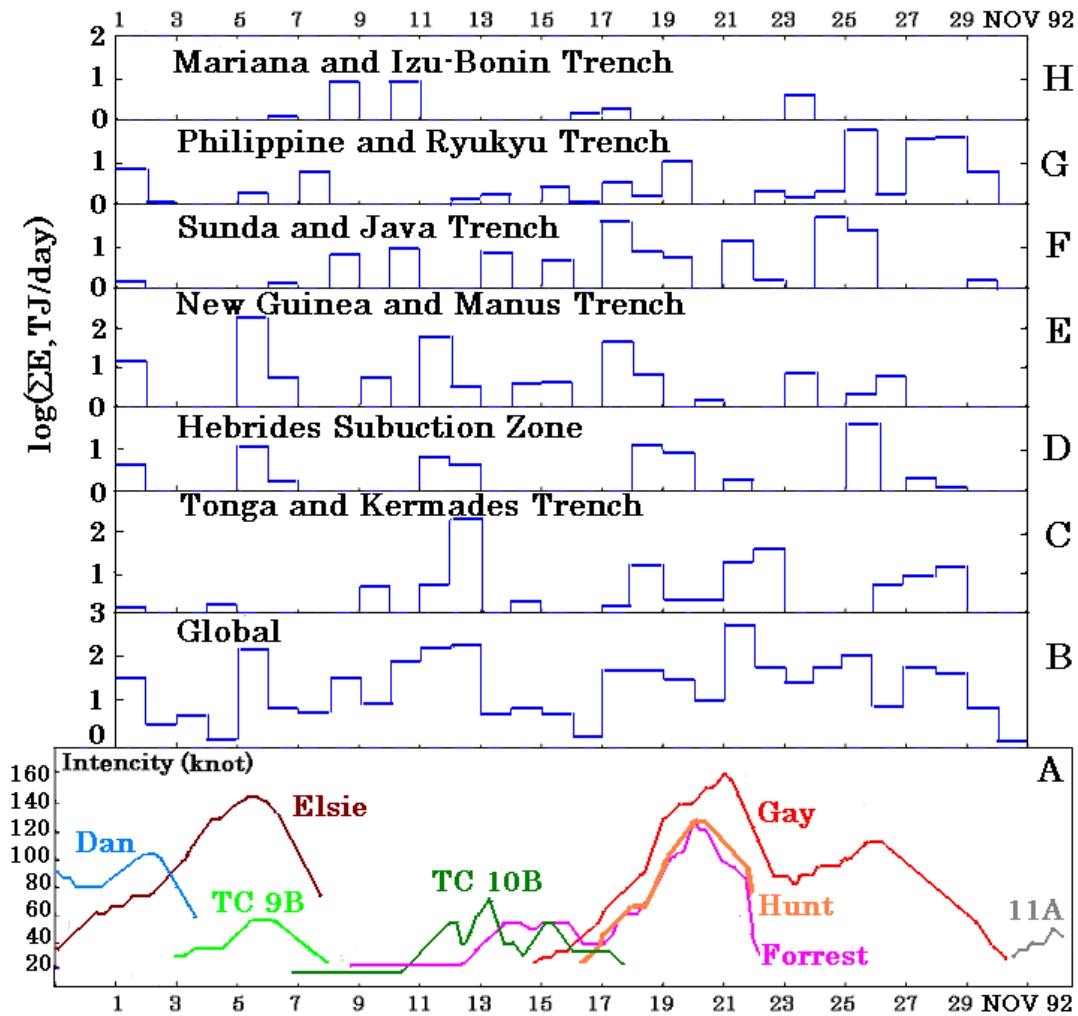


Figure. Relationship between TCs intensity and daily energy of lithospheric earthquakes

References

- Fan W., McGuire J.J., de Groot-Hedlin C.D., Hedlin M.A.H., Coats S., Fiedler J.W. Stormquakes // Geophysical Research Letters. 2019. V. 46. № 22. P. 12909–12918. DOI:10.1029/2019GL084217
- Kostin V., Belyaev G., Ovcharenko O., Trushkina E. Parameters of the upper ionosphere over tropical cyclones during changes in the stratosphere wind after eruption of the Mount Pinatubo // All-Russian open scientific conference «Pushkov readings: magnetism on Earth and in Space» May 15-16, 2019, Moscow, Troitsk, IZMIRAN. Collection of extended abstracts. 2019. P. 95–98. (In Russian).
- Kostin V., Belyaev G., Ovcharenko O., Trushkina E. Features of some interacting tropical cyclones in the Indian Ocean after the Mount Pinatubo eruption // International Journal of Engineering Research & Science. 2019a. V. 5. № 9. P. 19–26.
- Kostin V.M., Belyaev G.G., Ovcharenko O.Ya., Trushkina E.P. The relationship between the development of tropical cyclones and strong earthquakes in June 1992 according to the monitoring of the plasma of the ionosphere from the satellite Cosmos-1809 // Proceeding of the 18th conference «Modern problems of remote sensing of the Earth from space». 2020. P. 401. (In Russian).
- Kostin V., Belyaev G., Ovcharenko O., Trushkina E. Impact of France Nuclear Tests on typhoons and Earthquakes in November 1990 // International Journal of Engineering Research & Science. 2020a. V. 6. № 12. P. 25–31.

THE PROBLEM OF GELFAND – KREIN – LEVITAN AND PASSIVE IMAGING

Novikov R.G.^{1,2}

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

² *Ecole Polytechnique, Centre de Mathématiques Appliquées, France*

E-mail: novikov@cmap.polytechnique.fr

(oral)

We consider the problem of finding coefficients in the Shrödinger equation and the Helmholtz equation from boundary values of the imaginary part of the scattering Green function. Historically, this problem goes back to the inverse spectral problem posed by Krein, Gelfand, and Levitan in 1952. On the other hand, this problem arises in different passive tomographies. This talk is based, in particular, on references [Agaltsov, 2018] and [Agaltsov, 2020].

References

- Agaltsov A.D., Hohage T., Novikov R.G.* Monochromatic identities for the Green function and uniqueness results for passive imaging // *SIAM J. Appl. Math.* 2018. V. 78. № 5. P. 2865–2890.
- Agaltsov A.D., Hohage T., Novikov R.G.* Global uniqueness in a passive inverse problem of helioseismology // *Inverse Problems.* 2020. V. 36. № 5. Article 055004 (21pp).

SCALING OF SEISMIC HAZARD FOR THE NORTHERN CHILE EARTHQUAKE TAXONOMY

Cristián Siegel¹, Patricio Toledo¹, Raúl Madariaga², Jaime Campos¹

¹ *Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas,
Universidad de Chile, Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile*

² *Département de Géologie, Ecole Normale Supérieure, PSL University, 75005
Paris, France*

E-mail: Cristian.signa@gmail.com

(oral)

Highly active seismic zones like Northern Chile require an adequate characterization of the seismic hazard for the whole taxonomy – namely interface, intermediate depth, doubly seismic zone, upper plate – of possible earthquakes, being demonstrated in the past years that they carry different destructive potential. Due to the existence of an excellent seismic network (CSN – IPOC) new high-resolution seismic catalogs are available for detailed studies, such as the one we use recently published by [Sippl, 2018] that comprises the area between 19 and 23.5°S and from 71 to 68°W with completeness magnitude of ~ 3 . Using a similarity analysis [Barenblatt, 2003; Christensen, 2002; Nekrasova, 2020; Molchan, 2020] we show that the distribution of the expected number of events also depends on the taxonomy and that the observed mutual correlation between energy, space and time imply that the notion of precursor and replica does not strictly hold and depends on the considered scale.

References

- Barenblatt G. I. Scaling. Cambridge University Press, 2003. 186 pp.
- Christensen K., Danon L., Scanlon T., Bak P. Unified scaling law for earthquakes // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2002. V. 99. № 3. P. 2509–2513.
- Molchan G. Fractal seismicity and seismic risk // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2020. V. 56. № 1. P. 66–73.
- Nekrasova A., Kossobokov V. The unified scaling law for earthquakes // Journal of Volcanology and Seismology. 2020. V. 14. № 6. P. 353–372.
- Sippl C., Schurr B., Asch G., Kummerow J. Seismicity structure of the Northern Chile forearc from >100,000 double-difference relocated hypocenters // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2018. V. 123. № 5. P. 4063–4087.

THE STRUCTURE OF THE EARTH'S CRUST BY THE METHOD OF SEISMOTOMOGRAPHY

Yetirmishli G.J., Kazimova S.E.

Republican Seismic Survey Center of ANAS, Baku, Azerbaijan

E-mail: sabina.k@mail.ru

(oral)

The purpose of this article is to redefine the data of the hypocenters of earthquakes that occurred on the territory of Azerbaijan for the period 2010–2020 ($m_l > 2.0$) and calculation of the velocity model of the earth's crust using algorithms that are not included in the mandatory processing when compiling a catalog of seismic events [Kazimova, 2020].

The method of seismic tomography with double differences, or as it is commonly called DD tomography, allows one to analyze and compare the obtained velocity model and the positions of the hypocenters of the aftershock sequence with block-dividing faults and discontinuous deformations mapped on the surface. The double difference method [Waldhauser, 2001; Gunnels, 2021] is effective for joint redefinition of hypocenters in the case of a set of closely spaced foci and allows simultaneous redefinition of the locations of a large number of earthquake hypocenters at relatively large distances from the observing stations. In this case, the difference in the travel times of a wave from two close events is determined by the difference in the position of the hypocenters of these events. Thus, it is possible to refine the distance between events without using station corrections.

Comparing the values of the velocities with the values of the one-dimensional velocity model, it was found that at depths of 5–10 km, there is good convergence in the regions of the Greater Caucasus [Kazimova, 2017]. The middle Kura depression is mainly characterized by low velocities compared to the one-dimensional velocity model. In the depth interval of 7–10 km, the roof of the pre-Alpine basement is revealed. In this interval, a decrease in velocity is observed in the Evlakh-Agdzhabedi and Kurdamir-Saatli zones of the Middle Kura depression, which indirectly confirms the fracturing of rocks and the presence of a decompaction zone. At a depth of 15 km, the interface between the two media is also revealed. The velocities in this interval increase from 6.2 km/s to 7.0 km/s. According to the literature, the velocities of 6.0–6.2 km/s correspond to edges, and 6.5–7.6 are characteristic of basalts. Different parts of the region are characterized by different speeds. However, the regularity of the distribution of speeds in general for the region is observed. It is important to note that not all velocity boundaries in the volcanic strata are determined by the change in the material composition of the rocks. Some boundaries are associated with different stressed state of matter at depth, with the superposition of secondary processes of metamorphism, with a change in the physical state of matter, they can be caused by rheological stratification. It can

be noted that these depths reflect the surface of the substrate, formed over most of the region under consideration from metamorphosed rocks of the pre-Alpine basement, and in some areas from consolidated volcanic and metamorphosed rocks of the Mesozoic. In the depth interval of 17–25 km, the top of the basalt layer of the earth's crust is revealed. At a depth of 35 km, the Moho border. Based on the data obtained, it can be noted that the first interval from 5 to 17 km is associated with the boundary of the Kainazoi and Mesozoic deposits in the sedimentary cover, the second (17–25 km) – with the top of the consolidated part of the earth's crust (granite layer), the third (25–35 km) – refers to the basalt layer, the fourth (> 35 km) is associated with the upper boundary of the Moho (8–8.5 km/s). In the course of the calculations, a modern improved approach to modeling the velocity field in the crust and upper mantle of the territory of Azerbaijan was applied, including the selection of data, determination of the optimal one-dimensional model, recalculation of the earthquake hypocenters relative to the found optimal one-dimensional model and the calculation of the spatial velocity model. The applied data processing system provided for the verification of compliance with the selection criteria before the calculations and during the calculations, which made it possible to reduce the a priori error introduced by the data into the solution.

References

- Gunnels M., Yetrimishli G., Kazimova S., Sandvol E.* Seismotectonic evidence for subduction beneath the eastern Greater Caucasus // *Geophysical Journal International*. 2021. V. 224. Issue 3. P. 1825–1834.
- Kazimova S.E.* Redefinition of Earthquake Hypocenters by the Double Difference Method // *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. V. 10. № 4. P. 41–51.
- Kazimova S.E., Kazimov I.E.* Influence of one-dimensional velocity models on the determination of the main parameters of earthquake sources in Azerbaijan // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2017. V. 53. № 1. P. 69–82. DOI: 10.1134/S1069351317010098
- Waldhauser F., Ellsworth W.L.* HypoDD – A Program to Compute Double-Difference Hypocenter Locations // *US Geological Survey, Open-File Report 2001-113*. 27 p.



СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ И ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

29-30 сентября 2021 года
ИТПЗ РАН, Москва

ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ

29 сентября (среда)

09:00	Регистрация участников (холл у Конференц-зала ИКИ РАН)
10:00	Открытие (Конференц-зал ИКИ РАН) Доклад чл.-корр. РАН Ал.Ан. Соловьева (ИТПЗ РАН) «Академик В.И. Кейлис-Борок (1921-2013) – 70 лет на переднем крае науки» читает чл.-корр. РАН П.Н. Шебалин
Заседания по сессиям	
Сессия 1. Оценка сейсмической опасности, современные методы прогноза землетрясений Конвинер – В.Г. Кособоков (Конференц-зал ИКИ РАН)	
11:00	А.И. Горшков (ИТПЗ РАН), О.В. Новикова (ИТПЗ РАН), С. Димитрова (Национальный институт геофизики, геологии и географии, София, Болгария), Л. Димова (Физический факультет Софийского университета им. Климента Охридского, София, Болгария), Р. Райкова (Физический факультет Софийского университета им. Климента Охридского, София, Болгария) Сейсмоопасные (М6+) узлы Болгарского региона
11:15 online	А.Д. Завьялов (ИФЗ РАН) Алгоритм КОЗ – 35 лет тестирования и последние результаты
11:30 online	В.Г. Гитис, А.Б. Дерендяев, К.Н. Петров (ИППИ РАН) О подходе к систематическому прогнозу землетрясений
11:45	О.В. Новикова, А.И. Горшков (ИТПЗ РАН) Распознавание потенциальных цунамигенных источников в материковой Греции
12:00	Кофе (холл у Конференц-зала ИКИ РАН)
12:15	V.M. Kostin, G.G. Belyaev, O.Ya. Ovcharenko, E.P. Trushkina (Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS) Impact of typhoon gay on lithospheric earthquakes
12:30 online	В.Ф. Писаренко (ИТПЗ РАН) Оценка параметров усеченного распределения Гутенберга – Рихтера
12:45 online	В.И. Герман (КНИИГиМС, ИЗК СО РАН) Учет группирования землетрясений во времени при оценке сейсмической опасности

13:00 online	В.В. Ружич , Е.А. Левина (<i>ИЗК СО РАН</i>) Опыт среднесрочного прогноза опасных землетрясений в Байкальской рифтовой зоне
13:15 online	А.И. Обжиров (<i>ТОИ ДВО РАН</i>) Газогеохимический метод оценки сейсмической активности и прогноза землетрясений
13:30- 14:15	<i>Обед</i>
14:15 online	П.Н. Александров (<i>ЦГЭМИ ИФЗ РАН</i>), К.С. Непейна (<i>НС РАН в г. Бишкеке</i>) Перспективы развития геофизического мониторинга для изучения современных геодинамических процессов
14:30 online	В.И. Джурик , Е.В. Брыжак, С.П. Серебренников (<i>ИЗК СО РАН</i>) Сейсмодинамика Байкальского региона и оценка влияния мерзлотных условий на сейсмическую опасность при деградации мерзлоты
14:45 online	А.А. Гладков (<i>ГАУ ДО ИО «Центр развития дополнительного образования детей», детский технопарк «Кванториум Байкал», ИЗК СО РАН</i>), О.В. Лунина (<i>ГАУ ДО ИО «Центр развития дополнительного образования детей», детский технопарк «Кванториум Байкал»</i>) Web-ориентированная ГИС «ActiveTectonics» как банк данных информации по активной тектонике юга Восточной Сибири
15:00 online	С.П. Серебренников , В.И. Джурик, А.Ю. Ескин (<i>ИЗК СО РАН</i>) Материалы инженерно-сейсмологических исследований как основа для мониторинга сейсмической опасности Восточной Сибири
15:15 online	М.Н. Лопатин (<i>Иркутский государственный университет, ИЗК СО РАН</i>), Р.М. Семенов (<i>ИЗК СО РАН, Иркутский государственный университет путей сообщения</i>) Циклы при выявлении гидрогеохимического предвестника землетрясения
15:30 online	Л.П. Коган (<i>ННГАСУ</i>), К.Х. Канониди (<i>ИЗМИРАН</i>), А.Е. Вольвач (<i>КраО РАН</i>), Л.И. Надежка (<i>ВГУ</i>), И.Т. Бубукин (<i>НИРФИ</i>), О.В. Боборыкина (<i>ИФЗ РАН</i>), В.Б. Штенберг (<i>ННГАСУ</i>), Д.Т. Биазитов (<i>КФУ</i>) О возникновении серии детерминированных феноменов перед землетрясением магнитудой 5.4, произошедшего 25 июня 2021 года вблизи города Яйладере (Турция)
15:45	И.А. Воробьева (<i>ИТПЗ РАН</i>), А.И. Горшков (<i>ИТПЗ РАН</i>), П. Мандал (<i>CSIR-National Geophysical Research Institute, Hyderabad, India</i>) Моделирование возможности сильнейших землетрясений в Индо-Бирманской дуге
16:00 online	C. Siegel (<i>Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile</i>), P. Toledo (<i>Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile</i>), R. Madariaga (<i>Département de Géologie, Ecole Normale Supérieure, PSL University, Paris, France</i>), J. Campos (<i>Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile</i>) Scaling of Seismic Hazard for the Northern Chile Earthquake Taxonomy
16:15	М.В. Родкин (<i>ИТПЗ РАН, ИМГТ ДВО РАН</i>), А.М. Корженков (<i>ИФЗ РАН</i>), С.Б. Николаева (<i>ГИ КНЦ РАН</i>), С.Ж. Орунбаев (<i>Американский университет в Центральной Азии, Бишкек, Кыргызская Республика</i>) PGVEM – метод независимой оценки долгосрочной сейсмической опасности по полевым данным?
16:30	В.И. Кафган (<i>ГЦ РАН</i>) Коровая погода и сильные землетрясения. Дефицит современных движений и деформационные волны по ГНСС наблюдениям
16:45	В.Л. Ильченко (<i>ГИ КНЦ РАН</i>) Система разломов в зоне отлива вдоль береговой линии Турьего полуострова (Кандалакшский залив, Белое море) как признак современной сейсмо-тектонической активности

Сессия 2. Математическая геофизика и методы анализа сейсмических данных Конвинер – В.А. Желиговский (Семинарская №200 ИКИ РАН)	
11:00 online	И.И. Калинин (ИФЗ РАН), А.В. Михеева (ИВМиМГ СО РАН) Особенности поведения крипекс-параметра в глубинных сейсмофокальных зонах
11:15 online	Н.Р. Зейналова (ИТПЗ РАН, Технологический Институт Карлсруэ, Институт прикладных наук о Земле, Карлсруэ, Германия), А.Т. Исмаил-Заде (ИТПЗ РАН, Технологический Институт Карлсруэ, Институт прикладных наук о Земле, Карлсруэ, Германия), О.Э. Мельник (НИИ механики МГУ), И.А. Цепелев (Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН), В.М. Зобин (Центр вулканологических исследований, Университет де Колима, Мексика) Численное моделирование роста лавовых куполов на примере вулкана Колима в Мексике
11:30 online	I.E. Kazimov (Republican Seismic Survey Center of ANAS, Baku, Azerbaijan), S.E. Kazimova (Republican Seismic Survey Center of ANAS, Baku, Azerbaijan) Modern geodynamics of the eastern part of the Alpine-Himalayan folding belt according to GPS observations
11:45 online	G.J. Yetirmishli (Republican Seismic Survey Center of ANAS, Baku, Azerbaijan), S.E. Kazimova (Republican Seismic Survey Center of ANAS, Baku, Azerbaijan) The structure of the Earth's crust by the method of seismotomography
12:00	Кофе (холл у Конференц-зала ИКИ РАН)
12:15	В.А. Желиговский (ИТПЗ РАН) Пространственная аналитичность и глобальные априорные оценки соболевских норм решений системы уравнений диффузионной магнитогидродинамики и их производных по времени
12:30	А.А. Остапчук (ИДГ РАН) Структурные особенности интерфейса тектонического разлома по данным слабой сейсмичности
12:45 online	A. Shapoval (HSE University, IEPT RAS), B. Shapoval (University of Colorado Boulder, USA), M. Shnirman (IEPT RAS) 1/x power-law in a close proximity of the Bak–Tang–Wiesenfeld sandpile
13:00 online	R.G. Novikov (IEPT RAS, CNRS, Ecole Polytechnique, France) The problem of Gelfand–Krein–Levitan and passive imaging
13:15	О.М. Подвигина (ИТПЗ РАН) Гетероклинические сети и хаос
13:30- 14:15	Обед
14:15 online	A.I. Filippova (IZMIRAN, IEPT RAS), B.G. Bukchin (IEPT RAS), A.S. Fomochkina (Gubkin Russian State University of Oil and Gas, IEPT RAS) Source parameters of the September 21, 2020 Mw 5.6 Bystraya earthquake at the South-Western flank of the Baikal rift
14:30	К.В. Кислов (ИТПЗ РАН), В.В. Гравиров (ИТПЗ РАН, ИФЗ РАН) Чем DAS полезен для нас
14:45	Е.В. Андреев (ИТПЗ РАН) Оценка оптимизации численного решения уравнения Эйлера полулагранжевым методом

15:00	Е.М. Чураков (<i>РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина</i>) Оценки соболевских норм вторых производных по времени решений системы уравнений диффузионной магнитогидродинамики
15:15	А.А. Скоркина (<i>ИТПЗ РАН, ИФЗ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова</i>) О связи спектральных параметров и энергетических характеристик очага на примере землетрясений Дальневосточного региона
15:30 online	Л.Р. Ботвина (<i>Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН</i>), А.Д. Завьялов (<i>ИФЗ РАН</i>) О физическом смысле критериев, используемых в сейсмологии
15:45 online	Р.А. Чертовских (<i>Исследовательский центр систем и технологий, Инженерный факультет Университета Порто, ИТПЗ РАН</i>), В.А. Желиговский (<i>ИТПЗ РАН</i>) О разделении масштабов в задаче о кинематической генерации магнитного поля

29 сентября (среда) 17:00-19:00

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ Конвинер – А.К. Некрасова (Конференц-зал ИКИ РАН)	
А.С. Агаян (<i>МГУ им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, ИТПЗ РАН</i>), А.К. Некрасова (<i>ИТПЗ РАН</i>) Применение алгоритма топологической фильтрации DPS для анализа сейсмичности: Прибайкалье	
З.А. Адиллов , З.О. Асекова (<i>Дагестанский филиал ФИЦ ЕГС РАН</i>) Иерархическая ранжированность и масштабная инвариантность сейсмического процесса территории Дагестана	
В.Г. Бондур , М.Н. Цидилина , Е.В. Гапонова , О.С. Воронова , Н.В. Феоктистова (<i>НИИ «АЭРОКОСМОС»</i>) Исследования аномальных возмущений в системе литосфера-атмосфера-ионосфера в период подготовки землетрясения в Италии 24 августа 2016 г. по данным космического мониторинга	
В.Ю. Бурмин (<i>ИФЗ РАН</i>) Критерий С-оптимальности планов в задачах оптимального расположения сейсмических станций	
В.В. Гравиров (<i>ИФЗ РАН, ИТПЗ РАН</i>), Д.В. Лиходеев (<i>ИФЗ РАН</i>), К.В. Кислов (<i>ИТПЗ РАН</i>) Эльбрусская геофизическая система прецизионных температурных измерений: в погоне за 0.0001 градуса	
В.М. Костин (<i>ИЗМИРАН</i>) Ионосферные эффекты подземных ядерных взрывов по данным спутника Космос-1809	
К.В. Крушельницкий , С.Д. Маточкина (<i>ИТПЗ РАН</i>) Карта продуктивности землетрясений Камчатского региона	
А.И. Ливинский , А.И. Горшков , О.В. Новикова (<i>ИТПЗ РАН</i>) Характерные геолого-геофизические признаки рудоносных узлов Кавказа и Алтай-Саянского региона	
В.А. Павленко , А.Д. Завьялов (<i>ИФЗ РАН</i>) Сравнительный анализ методов оценки магнитуды представительной регистрации землетрясений	
Е.С. Подольская , А.К. Некрасова , Т.В. Прохорова , А.В. Трубенков , О.В. Селюцкая (<i>ИТПЗ РАН</i>) WEB-ГИС-обеспечение проектов ИТПЗ РАН	
А.Н. Сафронов (<i>ИФА РАН</i>) Новая теория эксплозивных и эффузивных вулканических извержений	
А.А. Скоркина (<i>ИТПЗ РАН, ИФЗ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова</i>), Р.Р. Хажаев (<i>МГУ им. М.В. Ломоносова, ИТПЗ РАН</i>) Почему сценарные землетрясения являются необходимым компонентом работ по оценке сейсмического риска	

30 сентября (четверг)

Сессия 1. Оценка сейсмической опасности, современные методы прогноза землетрясений Конвинер – А.И. Горшков (Конференц-зал ИКИ РАН)	
09:30	В.О. Михайлов (<i>ИФЗ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет</i>), В.А. Тимофеева (<i>ИФЗ РАН, ИТПЗ РАН</i>), В.Б. Смирнов (<i>МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, ИФЗ РАН</i>), Е.П. Тимошкина (<i>ИФЗ РАН</i>), Н.М. Шапиро (<i>ИФЗ РАН, Институт наук о Земле, Университет Гренобль-Альпы, Гренобль, Франция</i>) Моделирование поверхности разрыва Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. с использованием данных РСА-интерферометрии
09:45	Г.Г. Кочарян (<i>ИДГ РАН</i>) Исследования геомеханики разломов в интересах прогноза землетрясений
10:00	Г.М. Стеблов (<i>ИТПЗ РАН, ИФЗ РАН</i>) Спутниковый геодезический мониторинг сильнейших землетрясений
10:15	А.Л. Стром (<i>ООО «ИГИИС», ООО «ЦГИ»</i>), С.А. Перетокин (<i>ООО «ИГИИС», ИФЗ РАН</i>), Е.А. Зеленин (<i>ООО «ИГИИС», ГИН РАН</i>), О.В. Гайдаленок (<i>ООО «ИГИИС», ГИН РАН</i>) К оценке Ммах сейсмогенерирующих зон
10:30	М.В. Родкин (<i>ИТПЗ РАН, ИМГГ ДВО РАН</i>) Метод анализа ООСЗ – приложения к проблемам физики и прогноза землетрясений
10:45	Кофе (холл у Конференц-зала ИКИ РАН)
11:00	А.А. Любушин (<i>ИФЗ РАН</i>) Сейсмический шум и сейсмическая опасность на Японских островах
11:15	А.Н. Морозов (<i>ИФЗ РАН</i>), Н.В. Ваганова (<i>ФИЦКИА УрО РАН</i>) Уточнение параметров гипоцентров землетрясений, зарегистрированных в раннеинструментальный период
11:30	А.С. Батугин (<i>МИСиС</i>) Участки предельно напряженного состояния земной коры как среда для техногенных землетрясений
11:45	С.А. Пулинец (<i>ИКИ РАН</i>), В.В. Богданов (<i>ИКИР ДВО РАН</i>) Холистический подход к проблеме краткосрочного прогноза землетрясений в свете современной физической модели генерации предвестников
12:00	С.В. Баранов (<i>Кольский филиал ЕГС РАН, ИТПЗ РАН</i>), А.Ю. Моторин (<i>Кольский филиал ЕГС РАН, Кировский филиал АО «Апатит»</i>), П.Н. Шебалин (<i>ИТПЗ РАН</i>) Оценка магнитуды сильнейшего афтершока в Хибинском массиве
Специальная сессия 1921-2021: 100 лет со дня рождения В.И. Кейлис-Борока (Конференц-зал ИКИ РАН)	
13:00-15:00	А. Кашина, А.Т. Исмаил-Заде, И.В. Заляпин, В.Г. Кособоков, И.В. Кузнецов, А.Л. Левшин, М. Капуто, Г.М. Молчан, В.Ф. Писаренко, И.М. Ротвайн, П.Н. Шебалин, М.Г. Шнирман
15:00	Дружественный фуршет

Научное издание

II Всероссийская научная конференция с международным участием
Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений
ИТПЗ РАН, 29-30 сентября 2021 г., Москва, Россия

Тезисы докладов и программа конференции

Ответственный редактор:

к.ф.-м.н. О.В. Селюцкая

Компьютерная верстка:

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

Дизайн обложки:

д.ф.-м.н. В.Г. Кособоков

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

Москва-2021