

**Результаты исследований
по теме «Оценка
сейсмической опасности,
разработка и апробация
методов прогноза
землетрясений»,
полученные в 2020 году**

1. Прогноз землетрясений

Выполнен анализ 30-летнего глобального применения в режиме реального времени алгоритма среднесрочного прогноза землетрясений M8, в рамках которого каждое полугодие определяются области, в которых сильнейшие землетрясения мира актуально наиболее вероятны. На сегодняшний день статистика результатов, полученных в этом тесте, с достоверностью выше 99% свидетельствует о достаточно высокой эффективности прогнозов по алгоритму M8, а также в его комбинации с алгоритмом MSc, уточняющим локализацию очаговой зоны ожидаемого землетрясения. Тем самым нулевая гипотеза случайного возникновения в сейсмоактивных районах отвергнута с сейсмологической определенностью, по крайней мере, для сильнейших землетрясений мира из магнитудных диапазонов 8.0+ и 7.5+. Результаты этого экспериментального тестирования являются косвенным подтверждением предсказуемости сильных землетрясений, а также существования общих динамических характеристик и разнообразного поведения при фазовых переходах в сложной иерархической нелинейной системе разломов и блоков литосферы Земли.

Публикации:

Кособоков В.Г., Щепалина П.Д., 2020. Времена повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира: 30 лет проверки гипотезы в реальном времени // Физика Земли, № 1. С.43-52, doi:10.1134/S0002333720010068.

Ismail-Zadeh, A., Kossobokov, V., 2020. Earthquake Prediction, M8 Algorithm. In: Gupta, H. (ed), Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer (First Online: 30 May 2020), doi:10.1007/978-3-030-10475-7_157-1.

Обобщен опыт эксперимента по заблаговременному прогнозу землетрясений в период 2003-2019 гг. в пяти регионах мира по алгоритму Reverse Tracing of Precursors (RTP), в основе которого лежит явление увеличения радиуса корреляции сейсмичности перед землетрясениями. За период теста произошло 28 сильных землетрясений, из них 23 в области и в период тревог, диагностированных по алгоритму. При этом вероятность случайного успеха в этих регионах не превышала 30% и в среднем составляла около 15%. Эти результаты подтверждают эффективность алгоритма RTP. Тесты показали также высокую степень неслучайности совпадения сильных землетрясений и предшествующих им индикаторов увеличения радиуса корреляции – цепочек землетрясений.

Публикация:

Шебалин П.Н., 2020. Увеличение радиуса корреляции и цепочки землетрясений перед сильнейшими сейсмическими событиями // Физика Земли, № 1. С.30-42, doi:10.1134/S0002333720010135.

2. Оценка сейсмической опасности

2.1. Общий закон подобия для землетрясений

Распределение числа сейсмических событий по магнитуде – закон Гутенберга–Рихтера играет наиважнейшую роль в оценке сейсмической опасности территории. Предложенное в 1988 г. обобщение этого основного закона сейсмологии – Общий закон подобия для землетрясений (ОЗПЗ) – позволяет учитывать специфику распределения эпицентров сейсмических событий при изменении масштаба рассмотрения, что крайне важно для адекватного пересчета повторяемости в область меньшего размера на территории рассмотрения (например, в мегаполисе). Выполнен обзор использования ОЗПЗ в приложении к проблеме оценки сейсмической опасности и ассоциированных рисков.

Публикации:

Некрасова А.К., Кособоков В.Г., Парвез И.А., Тао Х., 2020. Общий закон подобия для землетрясений в приложении к оценке сейсмической опасности и ассоциированных рисков // Физика Земли, № 1. С.96-108, doi:10.1134/S0002333720010093.

Kossobokov V., 2020. Unified Scaling Law for Earthquakes that Generalizes the Fundamental Gutenberg-Richter Relationship. In: Gupta, H. (ed), Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer (First Online: 30 May 2020), doi:10.1007/978-3-030-10475-7_257-1.

Некрасова А.К., Кособоков В.Г., 2020. Общий закон подобия для землетрясений // Вулканология и сейсмология, № 6 (в печати).

2.2. Определение мест возможного возникновения сильных землетрясений

Выполнен анализ почти полувековой истории развития применения алгоритмов распознавания образов с целью решения проблемы определения мест возможного возникновения сильных землетрясений. Рассмотрены применяемые алгоритмы распознавания образов, исследуемые регионы и методы оценки достоверности получаемых результатов, включая теорию динамических и предельных задач распознавания. Представлен также разработанный в последнее время альтернативный метод решения проблемы путем выделения сгущений эпицентров землетрясений, основанный на принципах Дискретного математического анализа. Сравнение результатов, полученных с помощью этих двух методов, демонстрирует хорошее согласие, что является дополнительным аргументом в пользу их достоверности. Намечены перспективы их дальнейшего развития и совместного применения, а также создания на этой основе единого метода системного анализа с включением искусственного интеллекта. В случае успеха этот метод должен найти применение при оценке сейсмической опасности и планировании сейсмостойкого строительства.

Публикация:

Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Дзедобоев Б.А., 2020. Проблема распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений: Актуальный обзор // Физика Земли, № 1. С.5-29, doi:10.1134/S0002333720010044.

Для территории Эллинид, расположенных в южной части Балканского полуострова, определены геолого-геоморфологические критерии мест, в которых возможно возникновение землетрясений с $M \geq 7,0$ (Рис. 1). В качестве сейсмогенерирующих структур рассматриваются пересечения зон морфоструктурных линеаментов, которые были определены методом морфоструктурного районирования. Геолого-геоморфологические параметры были единообразно определены для всех пересечений линеаментов. Установлено, что эпицентры землетрясений с $M \geq 7,0$ приурочены к пересечениям линеаментов. Те пересечения, с которыми связаны наблюдаемые землетрясения $M \geq 7,0$, использованы для обучения алгоритма распознавания образов «Кора-3». На основе геолого-геоморфологических параметров алгоритмом распознавания были найдены характерные признаки, по которым все пересечения линеаментов были разделены на высоко (**В**) и низкосейсмичные (**Н**) относительно пороговой магнитуды $M_0 = 7,0$. В результате к высокосейсмичным были отнесены все эти пересечения, а также еще 24 пересечения, в которых события с $M \geq 7,0$ ранее не наблюдались. В частности, такие пересечения распознаны на острове Эвбея, где западная ветвь Северо-Анатолийского разлома подступает к берегам центральной Греции. Еще одна группа **В**-пересечений расположена в центральной части Коринфского залива - наиболее тектонически активной области региона, в которой однако землетрясений $M \geq 7,0$ до сих пор не зафиксировано. Характерные признаки **В**- и **Н**-пересечений (критерии сейсмичности) сформированы морфометрическими параметрами. Интервалы значений этих параметров, присущие **В**-пересечениям, косвенно свидетельствуют о процессах опускания и растяжения, доминирующих в областях расположения таких пересечений.

Публикация:

Горшков А.И., Новикова О.В., Гаудемер И., 2020. Потенциальные места сильных ($M \geq 7.0$) землетрясений в Эллинидах (Греция) // Физика Земли, № 1. С.53-61, doi:10.1134/S0002333720010032.

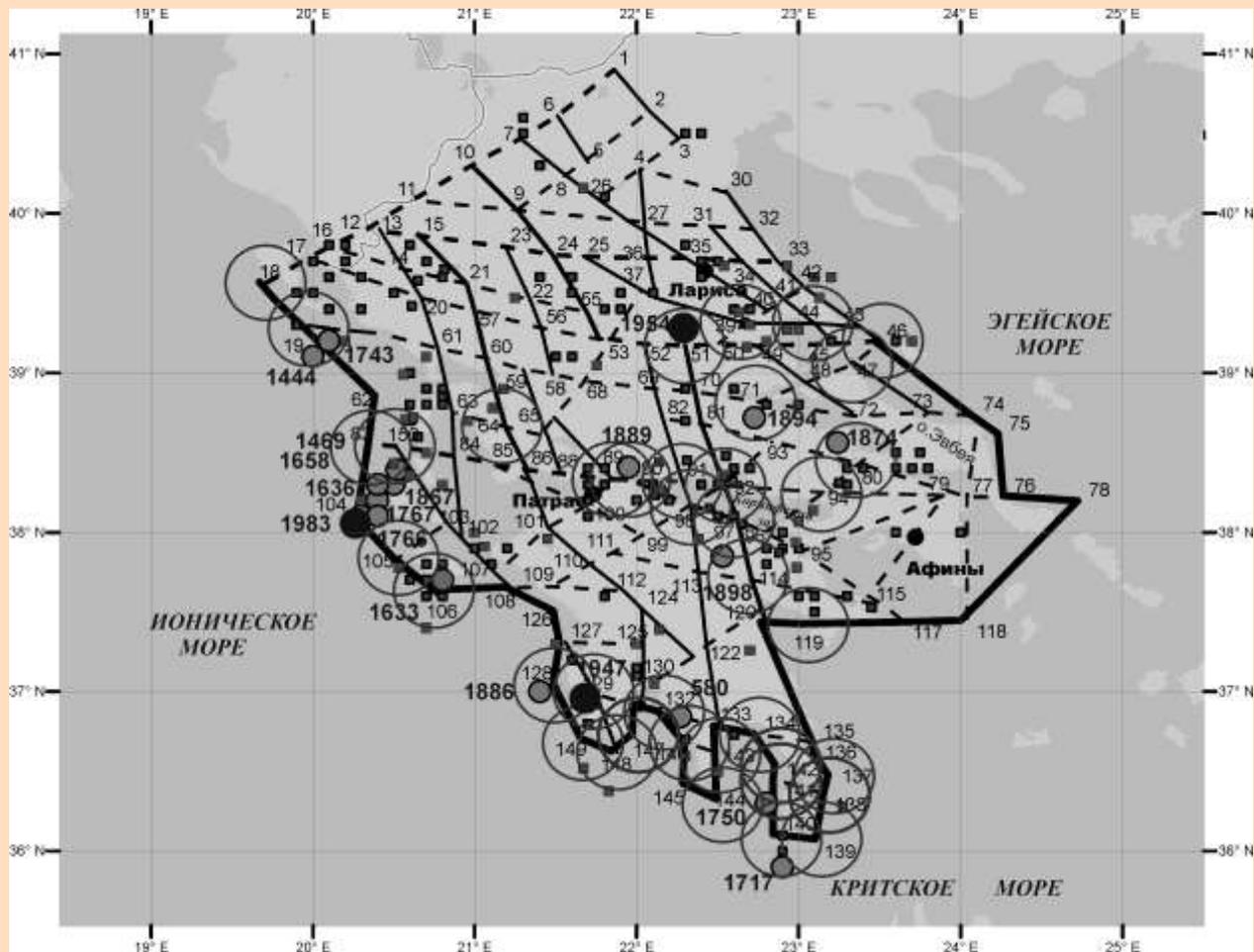


Рис. 1. Схема морфоструктурного районирования Эллинид и пересечения линеаментов, отнесенные к классу **B** для $M_w \geq 7,0$. Линиями показаны линеаменты. Толщина линий соответствует рангу линеаментов: самые толстые – первый ранг; средней толщины – второй ранг; тонкие – третий ранг. Сплошными линиями показаны продольные линеаменты, пунктирными – поперечные. Кругами отмечены распознанные высокосейсмичные пересечения для $M_w \geq 7,0$. Черными кружками показаны эпицентры землетрясений с $M \geq 7,0$ после 1900 г., светлыми - эпицентры землетрясений с $M_w \geq 7,0$ до 1900 г. Темные и светлые квадратики обозначают эпицентры землетрясений с $6,0 \leq M_w < 6,99$ после и до 1900г., соответственно. 1 – 150 номера пересечений линеаментов.

2.3. Оценка сейсмической опасности в конкретных регионах

Плато Шиллонг (ПШ). Сейсмотектонические процессы в регионе находились под влиянием гималайской орогении, индо-бирманской субдукции и эволюции Бенгальского бассейна, что привело к высокой сейсмической активности. Осуществлена вероятностная оценка сейсмической опасности ПШ с целью предоставления научной информации инженерным сообществам и сообществам по управлению рисками стихийных бедствий. Анализ сейсмической опасности используется для определения колебаний грунта в густонаселенных районах ПШ и, в частности, в городах Шиллонг, Нонгпох и Тура. Этот анализ основан на использовании исторических и инструментально зарегистрированных региональных землетрясений начиная с 1411 года и имеет дело с неопределенностями, связанными с магнитудами землетрясений, местами разрыва и частотой превышения скорости движения грунта.

Построенные кривые сейсмической опасности показывают, что разлом Барапани обладает самой высокой частотой превышения скорости движения грунта для городов Шиллонг и Нонгпоха, а Эоценовая шарнирная зона и разлом Дауки ответственны за самую высокую частоту сейсмической опасности в г. Тура. Результаты оценки опасности вместе с результатами, полученными ранее с использованием детерминированного (основанного на сценариях) подхода, показывают, что хотя Олдхэмский разлом, расположенный вблизи г. Тура, может вызвать сильное, но редкое землетрясение, лишь немногие другие близлежащие разломы способны вызвать события меньшей магнитуды но с более высокой вероятностью их проявления.

Публикация:

Baro, O., Kumar, A., and Ismail-Zadeh, A., 2020. Seismic hazard assessment of the Shillong Plateau using a probabilistic approach, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, doi:10.1080/19475705.2020.1833989 (in press).

Кавказ. Будучи частью продолжающегося континентального столкновения между Аравийской и Евразийской плитами, Кавказский регион является местом умеренной и сильной сейсмичности, где однако разрушительные землетрясения привели к значительным человеческим жертвам и материальным потерям. Исследованы геология и геодинамика Кавказа и его окрестностей, включая его палеозойско-палеогеновую и постколлизийную эволюцию до современных деформаций; магматизм и тепловой поток; активная тектоника и тектонические напряжения, вызванные континентальной коллизией. Выполнен анализ гравитационных моделей, разработанных для Кавказа, и связи их специфических особенностей с региональной системой разломов, а также последних геодезических исследований, связанных с региональными движениями. Исследована региональная сейсмичность с акцентом на подкоровую сейсмичность под северными предгорьями Большого Кавказа. Недавние сейсмические томографические исследования свидетельствуют в пользу отрыва литосферного корня под Малым и Большим Кавказом. Знание геодинамики, сейсмичности и напряженного режима в Кавказском регионе помогает в оценке сейсмической опасности и риска. Проведен обзор моделирования землетрясений и исследований сейсмической опасности, обеспечивающих связь между глубинными геодинамическими и поверхностными процессами. Определены существующие пробелы в современных научных знаниях Кавказского региона и предложены пути решения задач, которые могут улучшить понимание региональной эволюции, активной тектоники, геодинамики, коровой и глубокой сейсмичности и поверхностных проявлений динамики литосферы.

Публикация:

Ismail-Zadeh, A., S. Adamia, A. Chabukiani, T. Chelidze, S. Cloetingh, M. Floyd, A. Gorshkov, A. Gvishiani, T. Ismail-Zadeh, M. K. Kaban, F. Kadirov, J. Karapetyan, T. Kengerli, J. Kiria, I. Koulakov, J. Mosar, T. Mumladze, B. Müller, N. Sadradze, R. Safarov, F. Schilling, and A. Soloviev, 2020. Geodynamics, seismicity, and seismic hazards of the Caucasus, *Earth Sci. Rev.*, 207, 103222, doi:10.1016/j.earscirev.2020.103222.

2.4. Теоретические аспекты оценки сейсмического риска

Рассмотрены теоретические аспекты фрактальности и выполнен критический анализ её приложений к задачам сейсмического риска.

Публикация:

Молчан Г.М., 2020. Фрактальная сейсмичность и сейсмический риск // Физика Земли, № 1. С.77-85, doi:10.1134/S000233372001007X.

Исследованы локальные особенности функции очага, порождающие одновременно а) квадратичное затухание спектра и б) потерю направленности излучения в дальней зоне на высоких частотах. Этот вопрос ранее был поставлен и рассмотрен А.Гусевым. Предполагалось, что положительное решение может быть получено для фронтов разрыва с достаточно изрезанной (“кружевной”) структурой. Найдены условия, при которых реализуются перечисленные свойства функции очага. Показано, что они могут иметь место для относительно простой, но негладкой структуры фронта.

Публикация:

Молчан Г.М., 2020. Стохастическая модель А.Гусева для сейсмического источника: высокочастотное поведение в дальней зоне // Физика Земли, № 1. С.86-95, doi:10.1134/S0002333720010081.

3. Изучение сейсмичности

Показано, что неверным является один из постулатов практически всех моделей сейсмического режима и афтершоковых последовательностей, включая широко известную модель ETAS. Постулат состоит в том, что землетрясения одинаковой силы инициируют примерно одинаковое число зависимых событий (афтершоков), и его использование в моделях, по-видимому, приводит к завышенным оценкам сейсмической опасности. Оказалось, что разброс числа инициируемых землетрясениями событий, который очень велик, устойчиво подчиняется, аналогично магнитуде землетрясения, экспоненциальному распределению (Рис. 2), если магнитуда инициирующего землетрясения принадлежит интервалу определенной ширины. Эту закономерность получила название «Закон продуктивности землетрясений». Модель ETAS модифицирована путем включения в нее закона продуктивности. Новая модель ETAS-e позволила получить синтетический каталог, который, воспроизводит реалистичное распределение числа инициируемых землетрясений, в отличие от исходной модели ETAS, в которой для этого числа заложено распределение Пуассона.

Публикация:

Shebalin, P.N., C. Narteau, and S.V. Baranov, 2020. Earthquake productivity law. *Geophys. J. Int.*, **222**, 2: 1264-1269, doi:10.1093/gji/ggaa252.

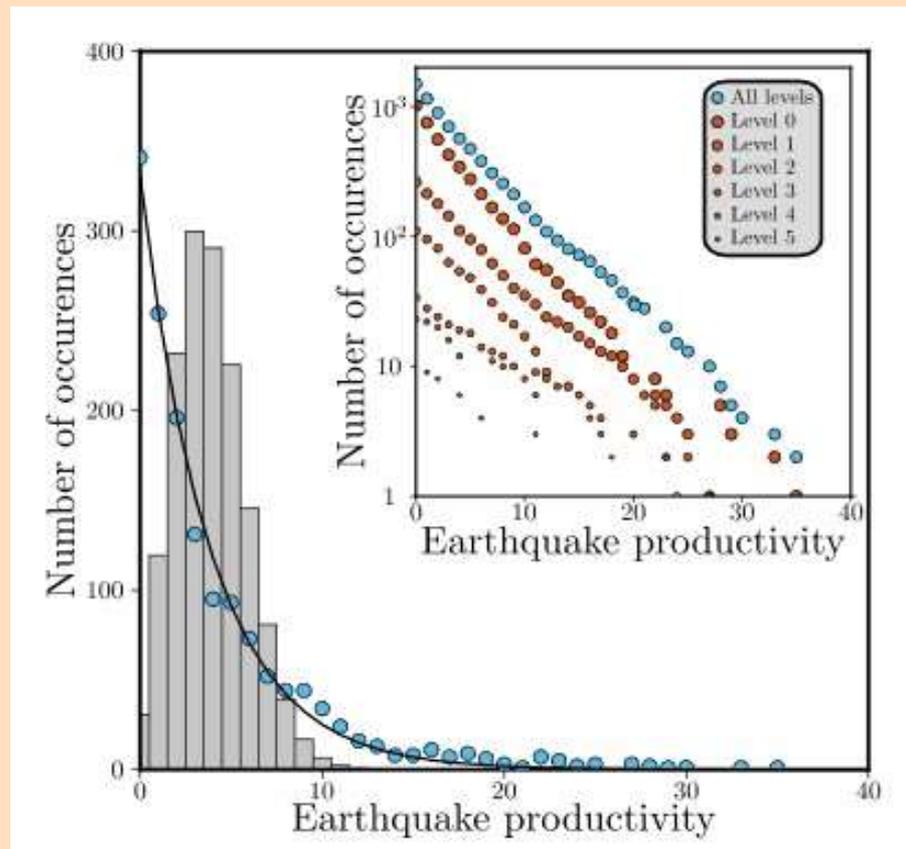


Рис. 2. Продуктивность землетрясений во всемирном каталоге. Точками показано распределение числа инициированных событий для землетрясений с $M \geq 6,5$ с использованием магнитудного интервала $\Delta M = 2$. Сплошная линия - это экспоненциальный закон с параметром Λ_2 , средним числом инициированных событий, полученным на основе данных. На гистограмме показано распределение Пуассона с параметром Λ_2 . На вставке показаны распределения совокупной продуктивности для первичных и вторичных запускающих событий..

Изучено влияние приливов на сейсмичность путем проведения совместного анализа высоты морского прилива, моделируемого программой FES 2004, и последовательностей афтершоков от 16 землетрясений с магнитудой 6 и выше у берегов Камчатки и от 15 землетрясений с магнитудой 6 и выше у берегов Новой Зеландии (Рис. 3). Анализ проведен с помощью функции дифференциального вероятностного выигрыша, указывающей во сколько раз изменяется интенсивность потока событий при определенных значениях каждого из факторов относительно базовой модели. В качестве базовой модели был принят степенной закон Омори-Утсу. Для высоты прилива получены усредненные функции дифференциального вероятностного выигрыша интенсивности потока афтершоков относительно базовой модели Омори-Утсу. Эти функции могут быть использованы для моделирования интенсивности потока афтершоков сильных землетрясений, в частности для оценок сейсмической опасности афтершоков. Результаты анализа приливов и интенсивности потока афтершоков демонстрируют устойчивый эффект значительного относительного возрастания интенсивности потока афтершоков (максимум примерно вдвое) на высокой воде (при приливе) и (или) низкой воде (отлив) в зависимости от типа землетрясений (взброс, сброс или проскальзывание). Предложено два различных физических механизма данного явления: уменьшение нормального давления при низкой воде и увеличение порового давления в разломе при высокой воде. Оба механизма уменьшают силу трения в разломе.

Публикация:

Shebalin, P.N., Baranov, A.A., 2020. Aftershock rate changes at different ocean tide heights. *Frontiers in Earth Science*, doi:10.3389/feart.2020.559624 (in press).

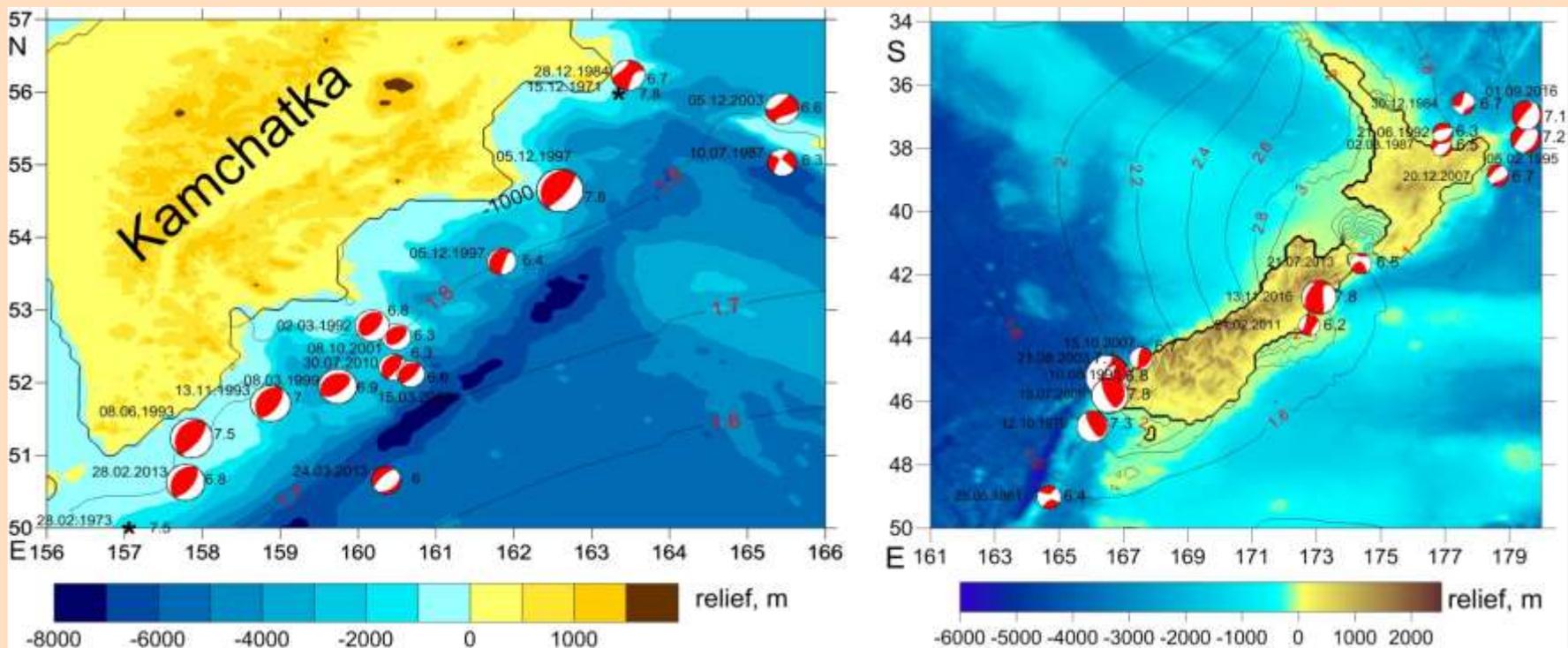


Рис. 3. Карты основных толчков с $M \geq 6$ вблизи Камчатки и Новой Зеландии, афтершоки которых использованы для анализа. Контурами показана максимальная амплитуда морского прилива в данной точке. Фокальные механизмы основных толчков взяты из глобального каталога СМТ (Global Centroid-Moment-Tensor catalog), в случае отсутствия в каталоге СМТ данных о землетрясении эпицентр обозначен звездочкой.

Исследована связь техногенной сейсмичности в регионах нефтеразработок с операциями гидроразрыва пласта и последующей закачки отработанной жидкости на глубину. Землетрясения возникают вследствие повышения порового давления, а также перераспределения напряжений в земной коре. Для Оклахомы, где резкое возрастание сейсмичности коррелирует с объемом операций нефтедобычи, показано, что график повторяемости существенно зависит от объема закачки. Наклон графика повторяемости слабой сейсмичности $M < 3.5$ почти постоянен, тогда как более сильные землетрясения показывают значительные вариации наклона от $b \approx 1$ до $b > 2$, и эти вариации сильно коррелированы с объемом закачиваемой жидкости (Рис. 4). Кроме того, сильнейшие наведенные события происходят на границе сейсмически активной территории, на расстоянии 15-20 км от областей интенсивной закачки. Отсюда следует, что дефицит сильных землетрясений в пространственно-временных областях максимальных объемов закачки может сопровождаться повышением уровня сейсмичности на окружающих разломах земной коры, где возникновение сильных триггерных землетрясений более вероятно.

Публикация:

Vorobieva, I., Shebalin, P., Narteau, C., 2020. Condition of occurrence of large man-made earthquakes in the zone of oil production, Oklahoma. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 56 (6): 911-919, doi:10.1134/S1069351320060130 (in press).

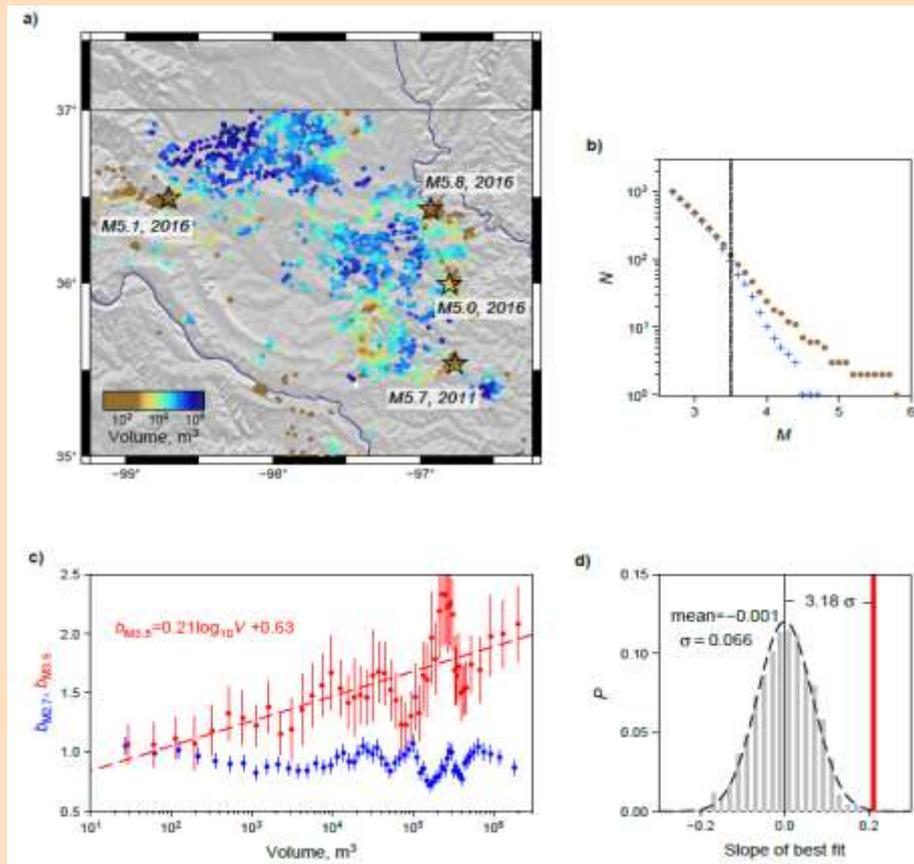


Рис. 4. Изменения распределения землетрясений по магнитуде в зависимости от интенсивности закачки: **(a)** – карта землетрясений с магнитудой $M \geq 2.7$, классифицированных по объему влияния; **(b)** – графики повторяемости для 1000 событий с минимальным (точки) и максимальным (+) объемом влияния; **(c)** – изменение наклонов графика повторяемости $b_{M3.5}$, $b_{M2.7}$ в двух магнитудных интервалах $[2.7; 3.4]$ (синий) и $[3.5; M_{\max}]$ (красный) с ростом объема закачивания V_E . Погрешность – одно стандартное отклонение, оцененное методом Монте-Карло. Красная штриховая линия – наилучшее линейное приближение зависимости $b_{M3.5}$ от $\log_{10} V_E$; **(d)** – распределение случайного тренда для 1000 полу-синтетических каталогов, наблюдаемый тренд показан красной линией.

Установлено принципиальное различие Центральноазиатской и Восточно-Азиатской транзитных зон, которое состоит в интенсивности сейсмичности, увеличивающейся к западу от геораздела 102-104° и уменьшающейся к востоку от него; в изменении в противоположном направлении интенсивности теплового потока (ТП); в неравномерном изменении замедления *S*-волн в литосферной и подлитосферной мантии в Восточно-Азиатской и на севере Центральноазиатской зон (Рис. 5). Это различие связано с влиянием давления Индостанского индентора на западе и с прослеживаемым по данным томографии неравномерным продолжением Тихоокеанского слэба в подлитосферной мантии на востоке, а также на севере Центральноазиатской зоны. Косвенными доказательствами продолжения, стагнации и постепенного распада слэба на глубине на значительном расстоянии от активной окраины являются сходство мантийной и нижнелитосферной деламации с хорошо изученными данными вблизи этой окраины, проявления позднекайнозойского вулканизма, процессов растяжения с формированием рифтовых бассейнов и молодых депрессий, а также развитие повышенного ТП в пределах Восточно-Азиатской транзитной зоны.

Публикации:

- Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В., 2020. К проблеме различия современной геодинамики Центральной и Восточной Азии // Физика Земли, 2020, № 1. С.142-149, doi:10.1134/S0002333720010020.
- Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В., Рундквист Д.В., 2020. Геодинамические режимы Центральной Азии к западу и востоку от геораздела 102-104° // Geodynamics & Tectonophysics, т.11, № 2. С.334-351, doi:10.5800/GT-2020-11-2-0478.

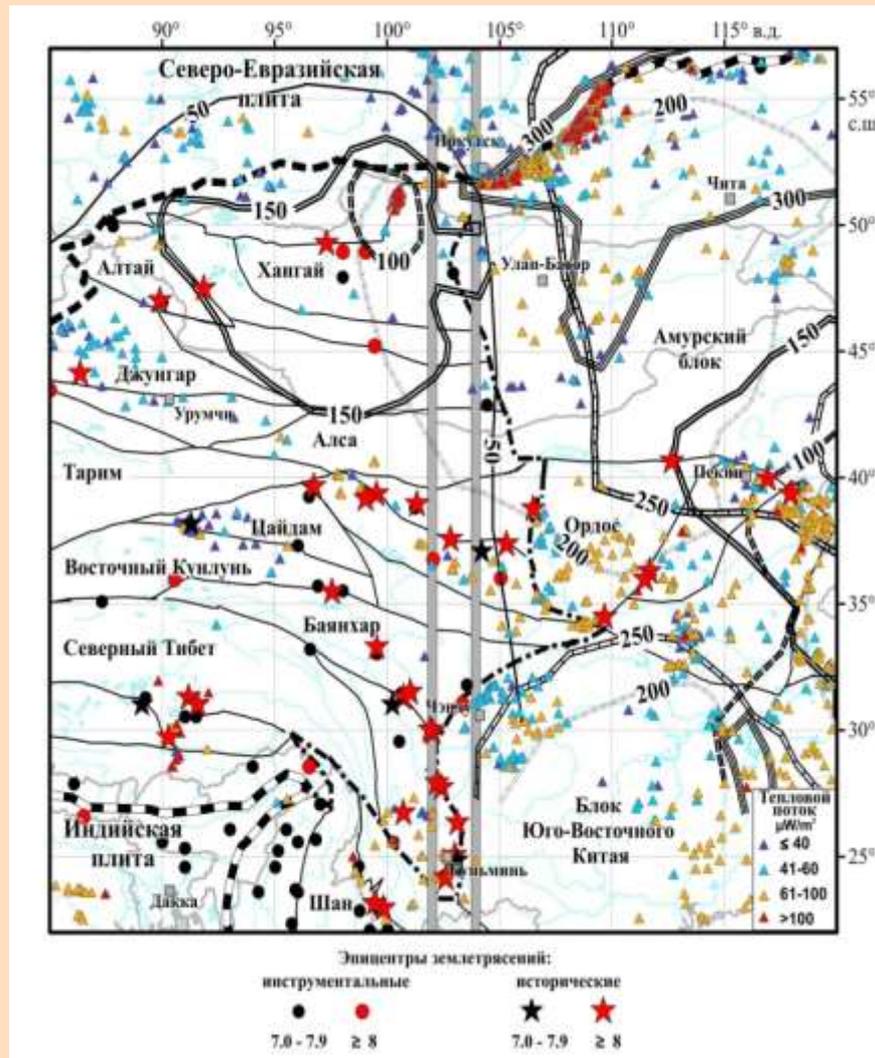


Рис. 5. Схема блоковой структуры Центральной Азии с границами литосферных плит, транзитных зон, блоков и геораздела. Показаны эпицентры землетрясений и данные ТП, а также проекции на поверхность Земли контуров замедления скоростей S -волн от 4.5 до 4.2 км /сек. на глубинах от 100 до 300 км.

**СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ!**