

УДК 550.24

**Е. В. Архипова, А. Д. Жигалин, Г. В. Брянцева, И. С. Гусева,
Е. Э. Тормышева**

Особенности долговременных вариаций сейсмичности активных мегаструктур современной Земли

На основе сравнительного анализа долговременных вариаций количества землетрясений установлен ряд характерных особенностей сейсмического режима в различных геодинамических обстановках, включая области субдукции, коллизии, рифтогенеза и спрединга. В их числе согласованное синхронное или противофазное изменение количества землетрясений для регионов в пределах единых мегаструктур, согласованные изменения активности землетрясений на различных глубинных уровнях. Полученные данные свидетельствуют о системном единстве проявлений сейсмичности Земли и позволяют использовать метод сравнительного анализа для выявления динамически связанных объемов литосферы.

Ключевые слова: долговременные вариации сейсмической активности, современные геодинамические процессы, согласованные вариации количества землетрясений

Об авторах

Архипова Елена Витальевна – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры экологии и наук о Земле, доцент кафедры общей и прикладной геофизики факультета естественных и инженерных наук государственного университета «Дубна». *E-mail: olenageo@mail.ru*. 141825 Московская обл., Дмитровский р-он, с. Орудьево, ул. Центральная, д. 7.

Жигалин Александр Дмитриевич – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории разработки методов прогноза землетрясений ИФЗ РАН им. О.Ю. Шмидта, ведущий научный сотрудник кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Брянцева Галина Владимировна – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры динамической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, доцент кафедры экологии и наук о Земле государственного университета «Дубна».

Гусева Ирина Сергеевна – аспирант кафедры экологии и наук о Земле государственного университета «Дубна».

Тормышева Екатерина Эдуардовна – студент магистратуры кафедры экологии и наук о Земле государственного университета «Дубна».

Пространственная приуроченность землетрясений к тектонически активным поясам Земли, высокая сейсмичность определенных уровней литосферы, наличие глобальных периодов увеличения количества сильных землетрясений позволяют рассматривать сейсмические процессы как закономерное проявление современной геодинамической жизни планеты. В 1988 г. японский сейсмолог К. Могги отмечал: «То обстоятельство, что сейсмическая активность возрастает сразу на всем протяжении границ плит, а затем сразу прекращается, заслуживает пристального внимания. Это означает, что весьма отдаленные районы связаны друг с другом механически». К. Могги рассматривал наличие синхронных периодов активности на отрезках Тихоокеан-

ского и Альпийско-Гималайского поясов как «подтверждение теории жестких плит с точки зрения сейсмологии» [8]. Н.Н. Горькавым и соавторами выявлено наличие взаимосвязи вариаций числа землетрясений для отдельных полушарий и сегментов земного шара, которое авторы связывают с особенностями перераспределения напряжений и деформаций в результате неравномерного вращения Земли [4]. В феврале 2009 г. на Сагитовских чтениях, организуемых ГАИШ МГУ, представлен доклад, в котором отмечена синхронность крупных литосферных деформаций и сильных землетрясений Земли. В рамках геодинамической ротационной модели, предлагаемой докладчиками, процессы перераспределения напряженно-деформированного состояния земной коры, в том числе в местах подготовки сейсмических событий, классифицируются как реакция момента количества движения отдельных

блоков или совокупности фрагментов литосферы на изменение скорости вращения Земли [7]. Увеличение плотности сети сейсмостанций, точности определения координат эпицентров, глубины очагов землетрясений и их магнитуды в целом повышает достоверность сейсмических наблюдений, представительность сейсмических каталогов и позволяет использовать сейсмологические данные для более детальных и обоснованных обобщений.

Цель и задачи исследований

Основной целью исследований является выявление долговременных тенденций изменения сейсмичности в пределах зон современной геодинамической активности и поиск закономерностей, позволяющих наметить черты сходства и системного единства для отдельных сейсмоактивных регионов по латерали и по вертикали.

В предлагаемой статье выполнено обобщение материалов, полученных с использованием сравнительного анализа долговременных изменений количества землетрясений в течении последних пяти лет, дополненное новыми материалами, в основном посвященным исследованиям современной активности Тихоокеанского пояса [1–3; 5; 6]. Исследованы сейсмоактивные регионы с принципиально разным стилем геодинамического развития. Сравнительный анализ выполнен для островных дуг Западно-Тихоокеанской окраины и сейсмоактивных районов Восточной части Тихоокеанского пояса, различных сегментов в пределах коллизионных зон Альпийско-Гималайского пояса (АГП) с отличающимися стилями геодинамического развития, включая процессы поперечного сжатия и укорочения АГП и процессы сдвигового характера, обеспечивающие отток горных масс из областей максимального сжатия. Рассматривались вариации сейсмичности в обстановке континентального рифтогенеза – в пределах Байкальской рифтовой зоны, а также в обстановке спрединга в районе хребта Книповича.

Исходные данные и методика

В качестве основного метода для выявления системных взаимосвязей между отдельными сейсмоактивными блоками земной коры применялся сравнительный анализ долговре-

менных изменений количества землетрясений. Исходные данные для анализа получены с использованием Всемирного каталога землетрясений Геологической службы США [10]. Главным отличием от методики, реализованной Н.Н. Горькавым с соавторами [4], является то, что выделяются не отдельные геометрически правильные сегменты, а регионы, развитие которых происходит в условиях определенных геодинамических обстановок.

Сейсмический процесс принято рассматривать как процесс разрядки упругих напряжений, возникающих в ходе тектонических деформаций, и масштаб таких деформаций на разных уровнях структурной организации вещества отличается. Процессы акустической эмиссии отражают разрушение в локальных объемах, слабые землетрясения могут быть проявлением деформационных процессов в отдельных тектонических структурах и районах, сильные события сравнительно редки и являются результатом разрядки напряжений, возникающих в планетарном масштабе. При сравнительном анализе принимаются во внимание землетрясения, начиная с магнитуд 4,5, т.е. основной объем выборки представляют землетрясения средней силы. Сопоставление вариаций таких событий и выявление их корреляционных взаимосвязей позволяет обнаружить системное единство геодинамических процессов общего происхождения, управляемых процессами регионального масштаба на конвергентных границах плит.

Реализация метода включает несколько этапов. На предварительном этапе в сейсмически активных поясах выделяются объемы с высокой плотностью очагов землетрясений, затем в пределах таких объемов выполняется анализ распределения гипоцентров по глубинам, выделяются наиболее активные уровни. Для каждой выборки проводится анализ представительности каталога путем построения графиков повторяемости, производится выбор минимальной магнитуды выборки для построения временных рядов (рис. 1).

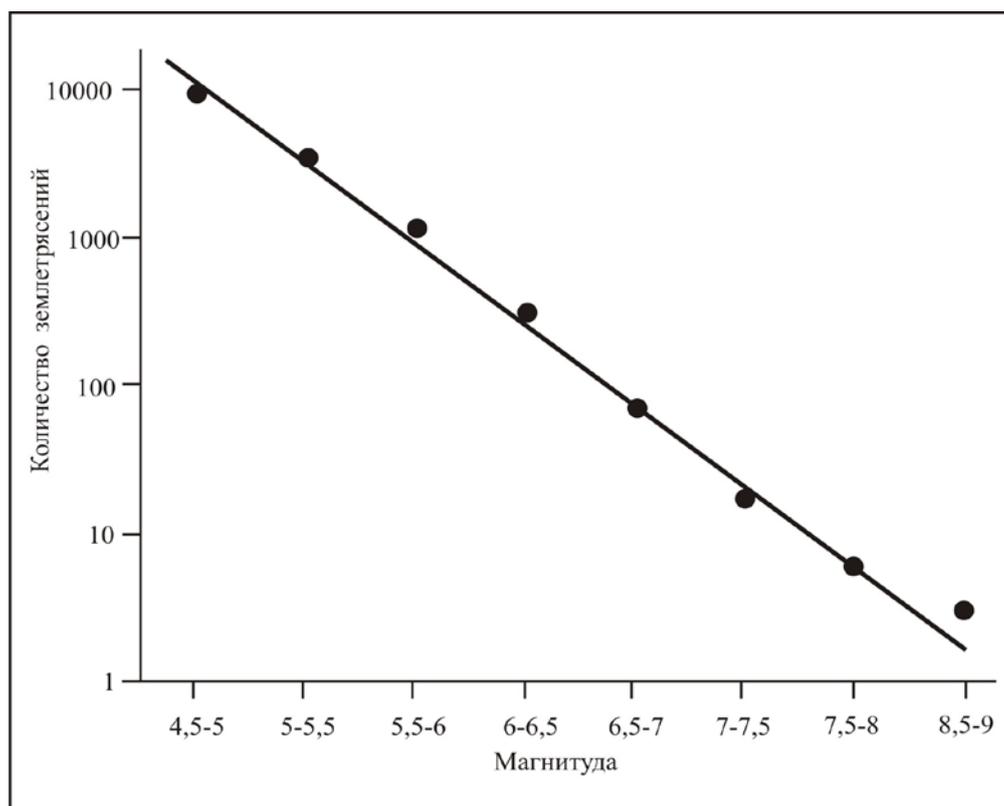


Рис. 1. График повторяемости сейсмических событий в районе желоба Тонга в период с 1973 по 2018 гг.

На следующем этапе для активных блоков в целом и для отдельных сейсмоактивных уровней строятся временные ряды, отражающие вариации количества землетрясений. Для получения графиков, отражающих плавные тенденции в изменении сейсмической активности, проводится скользящее осреднение пятилетних и десятилетних сумм землетрясений со сдвигом в один год, проводится их перекрестная парная корреляция. Полученные данные, по существу, отражают временной ритм современных геодинамических процессов и позволяют выявить регионы с согласованным геодинамическим развитием. Результаты анализа сопоставляются с информацией по геологическому строению, особенностям современного развития активных блоков литосферы, проводится геотектоническая интерпретация полученных данных.

Результаты и их обсуждение

В ходе исследований авторами выявлены черты системного единства проявлений сейсмичности в пределах современных тектонически активных поясов, отдельных объемов литосферы в их пределах, различных уровней коры и верхней мантии. Рассмотрим сейсмо-

активные районы с различным стилем геодинамического развития.

Тихоокеанский пояс. Тихоокеанский пояс является самой крупной мегаструктурой современной Земли. В его пределах происходит три четверти всех регистрируемых сейсмических событий. Высокая сейсмическая активность пояса обусловлена процессом субдукции – пододвигания Тихоокеанской литосферной плиты под окрестные континенты и островные дуги. Очаги землетрясений в пределах пояса распространены в широком интервале глубин вплоть до более 700 км и приурочены к наклонной поверхности – зоне Заварицкого-Ваадати-Беньофа (зоне ЗВБ), представляющей собой область контакта литосферных плит в зоне субдукции. В ходе исследования сейсмоактивные окраины Тихого океаны были разделены на отдельные сегменты с высокой плотностью сейсмических событий. В целом такие сегменты для западной части Тихого океана соответствуют островным дугам с примыкающими зонами глубоководных желобов, для восточной части – участкам высокой концентрации событий вдоль окраин Андского типа, включая горноскладчатые сооружения в зонах субдукции

и примыкающие области желобов. По каждому из выделенных сегментов сделаны выбор-

ки событий с M_{\min} от 4,5.

Таблица 1. Корреляция временных рядов сейсмоактивных секторов в приэкваториальной части Тихого океана для всех глубин. Скользящее среднее по 10 годам, период 1973–2018 гг.

	Центрально-Американский желоб	Марианская дуга	Идзу-Боннинская дуга	Японский желоб
Центрально-Американский желоб		0,89	0,89	0,94
Марианская дуга	0,89		0,76	0,80
Идзу-Боннинская дуга	0,89	0,76		0,92
Японский желоб	0,94	0,80	0,92	

Таблица 2. Корреляция временных рядов в пределах сейсмоактивных секторов в приэкваториальной части Тихого океана для глубин менее 30 км. Скользящее среднее по 10 годам, период 1973–2018 гг.

	Центрально-Американский желоб	Марианская дуга	Идзу-Боннинская дуга	Японский желоб
Центрально-Американский желоб		0,98	0,95	0,95
Марианская дуга	0,98		0,94	0,93
Идзу-Боннинская дуга	0,95	0,94		0,96
Японский желоб	0,95	0,93	0,96	

На основе выборок рассчитаны временные ряды со скользящим осреднением годового количества землетрясений по пяти и десяти годам, отражающие длиннопериодные вариации землетрясений. Временные ряды строились для регионов в целом, а также для отдельных уровней с высокой сейсмической активностью. Парной корреляцией временных рядов выявлены динамически связанные регионы со сходным режимом сейсмичности как для регионов в целом, так и на определенных

уровнях глубины (табл. 1, 2). Выяснилось, что сейсмические вариации по обе стороны Тихого океана обладают близким соответствием. Наиболее высокая корреляция выявлена для Японской и Идзу-Боннинской островных дуг (рис. 2).

Скользящее осреднение по 5 годам, сдвиг один год, интервал данных с 1973 по 2018 гг., на горизонтальной оси указан год середины пятилетнего интервала.

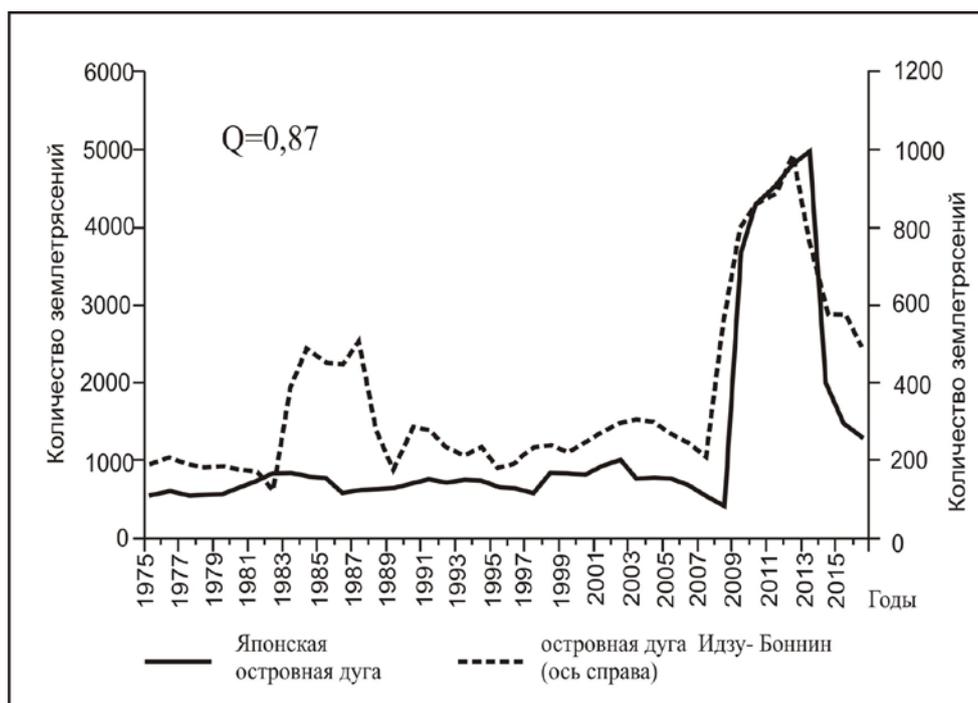


Рис. 2. Синхронное изменение количества событий с M от 4,5 для Японской островной дуги и Идзу-Боннинской островной дуги, расположенных в пределах Западно-Тихоокеанской окраины

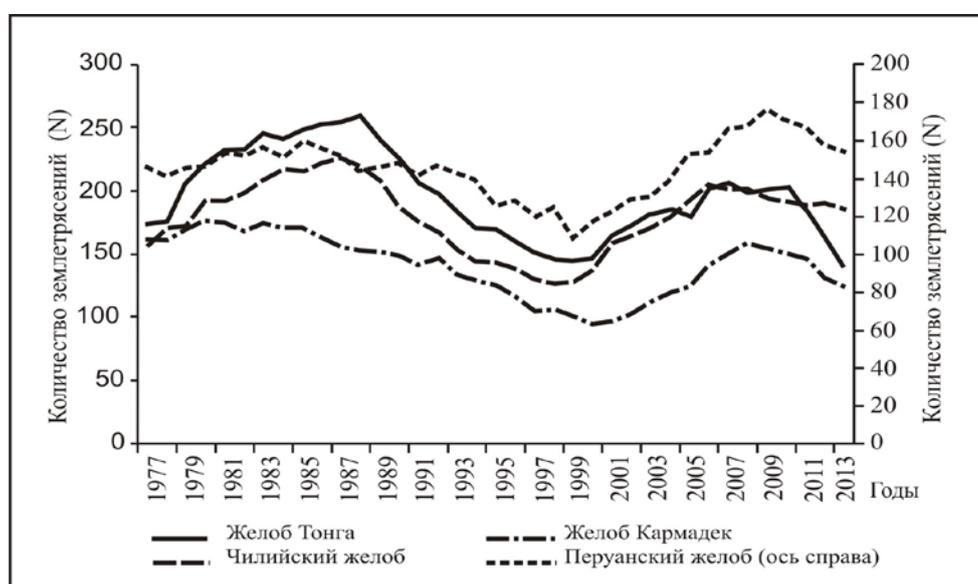


Рис. 3. Синхронное изменение количества событий с M от 4,5 вдоль сейсмоактивных зон в южной и центральной части Тихоокеанского пояса. Глубина очагов ≥ 100 км, скользящее среднее по 10 годам, сдвиг 1 год

При сопоставлении временных рядов сейсмоактивных сегментов в южной части Тихого океана выяснилось, что долговременные тенденции изменения активности землетрясений в их пределах весьма близки, и практически синхронное соответствие прослежи-

вается для временных рядов на мантийных глубинах более 100 км (рис. 3).

При перекрёстной корреляции временных рядов количества землетрясений наиболее тесное совпадение обнаружено для субдукционных окраин центральной и южной части Тихого океана, северные регионы ведут

себя относительно обособленно. Так, при близком соответствии временных вариаций внутри Курило-Камчатско-Сахалинского сегмента [2], при их сопоставлении с временным ходом землетрясений других сегментов субдукционных окраин Тихого океана близкого

соответствия не выявлено. Вместе с тем, при сопоставлении Северо-Западного сегмента в целом с Юго-Западным и Юго-Восточным согласованное изменение числа землетрясений обнаружено для событий с очагами на глубинах от 35 до 100 км (рис. 4).

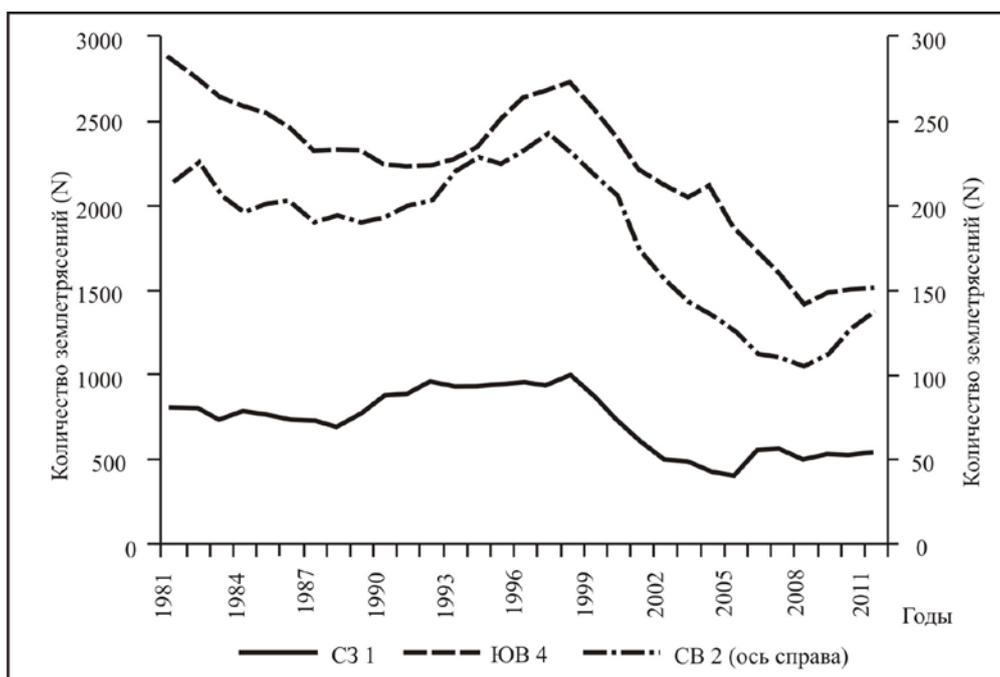


Рис. 4. Положительная корреляция временных рядов годового числа землетрясений для трех секторов Тихоокеанского активного пояса на глубинах 30–35 км со скользящим осреднением по 10 годам и сдвигом в 1 год. М от 5: СЗ 1 – северо-западный сектор; ЮВ 4 – юго-восточный сектор; СВ 2 – северо-восточный сектор [3]

Совершенно обособленно ведет себя северо-западная окраина Северо-Американского континента. В последнем случае отличия могут быть связаны с причинами как естественного, так и техногенного характера. Процесс субдукции здесь практически не выражен по сравнению с другими областями периферии Тихого океана, и сейсмичность локализована в пределах зон субширотного простираения, по-видимому, представляющих собой трансформные разломы поглощенной в ранее существовавшей зоне субдукции северной части Тихоокеанского срединно-океанического хребта. Техногенной составляющей, которая стала причиной дестабилизации естественного хода сейсмичности, является проведение подземных ядерных испытаний на полигоне Невада, одном из крупнейших ядерных полигонов США, на котором начиная с 1951 г. осуществлено 928 ядерных взрывов [9].

Таким образом, в ходе сравнительного анализа тенденций в изменении сейсмичности субдукционных окраин Тихого океана выяснилось, что наиболее близкое соответствие временных вариаций наблюдается для регионов, расположенных в приэкваториальной и южной части на противоположных окраинах Тихого океана, северные районы в силу различных причин ведут себя относительно обособленно.

Альпийско-Гималайский пояс. Альпийско-Гималайский пояс образовался в результате замыкания океана Тетис, разделявшего литосферные плиты Гондванской группы и Лавразию. Горно-складчатые сооружения пояса имеют сходную структуру и близкий состав отложений, но степень сближения отдельных литосферных плит неодинакова. Наиболее интенсивное развитие коллизионных процессов характерно для восточной части пояса, в области коллизии Индостана

и современной Северной Евразии (ИЕКО). Сближение в области коллизии реализуется за счет сжатия и скучивания горных масс, затрагивающего глубинные структуры фундамента. В зоне коллизии Северной Евразии и Аравии (АЕКО) существует несколько иной механизм перераспределения вещества с оттоком из областей максимального сжатия

в направлении геодинамических убежищ Иранского нагорья и Эгейского моря. Несмотря на различия в механизмах перераспределения горных масс из областей максимального сжатия, при анализе временных вариаций сейсмичности выявлены некоторые закономерности и черты сходства современного развития этих коллизионных областей.

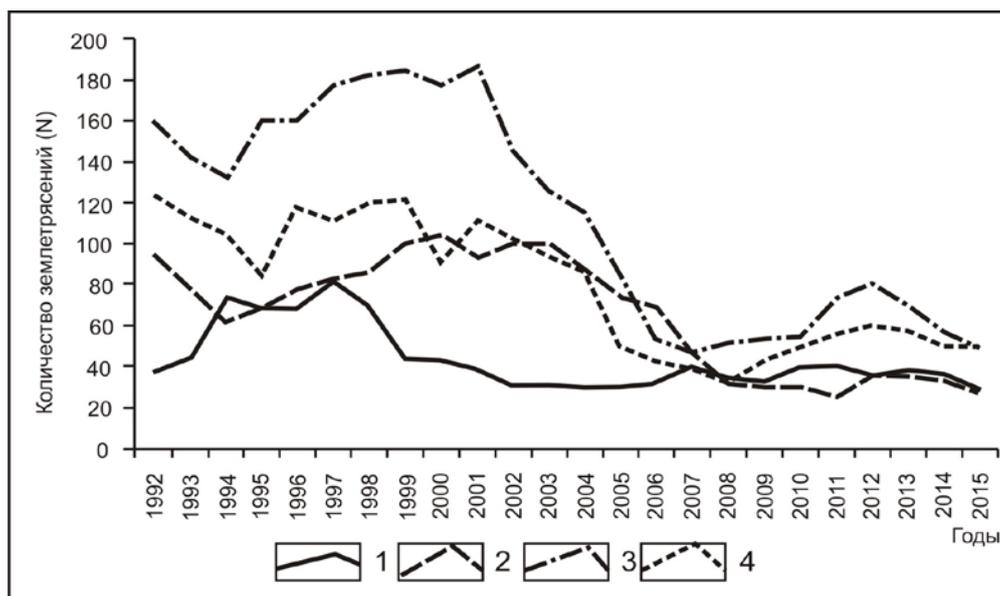


Рис. 5. Изменение активности землетрясений на флангах коллизионных зон Альпийско-Гималайского пояса на глубинах 15–40 км с 1973 по 2017 гг.

Скользящее осреднение количества землетрясений с M от 4 по 5 г., сдвиг 1 год (по данным [6]):

1 – западный фланг области АЕКО; 2 – восточный фланг области АЕКО; 3 – западный фланг области ИЕКО; 4 – восточный фланг области АЕКО

При сопоставлении временных рядов в целом значимой корреляции не выявлено, но для рядов, соответствующих глубинным уровням средней и верхней коры и мантии, отмечена высокая согласованность событий для отдельных литосферных оболочек. Относительная независимость сейсмических событий небольших глубин в ряде регионов обусловлена высокой хрупкостью и раздробленностью верхних горизонтов коры, но в целом для них хорошо выражена тенденция к активизации сейсмичности к концу XX – началу XXI вв., возможно, связанная с увеличением техногенного влияния на геологическую среду, в частности, наличием бомбардировок.

Многие из сейсмически активных регионов АГП являлись и по-прежнему остаются территориями военных конфликтов [11].

На глубинах от 15 до 40 км наблюдается более выраженная согласованность временных вариаций для регионов, расположенных на различных флангах коллизионных областей с общим снижением активности этих глубинных горизонтов к концу рассматриваемого периода с 1973 по 2017 гг. (рис. 5, 6). Еще одной характерной особенностью изменения сейсмичности в пределах коллизионных зон АГП является противофазное изменение активности землетрясений различных уровней (см. рис. 6, 7).

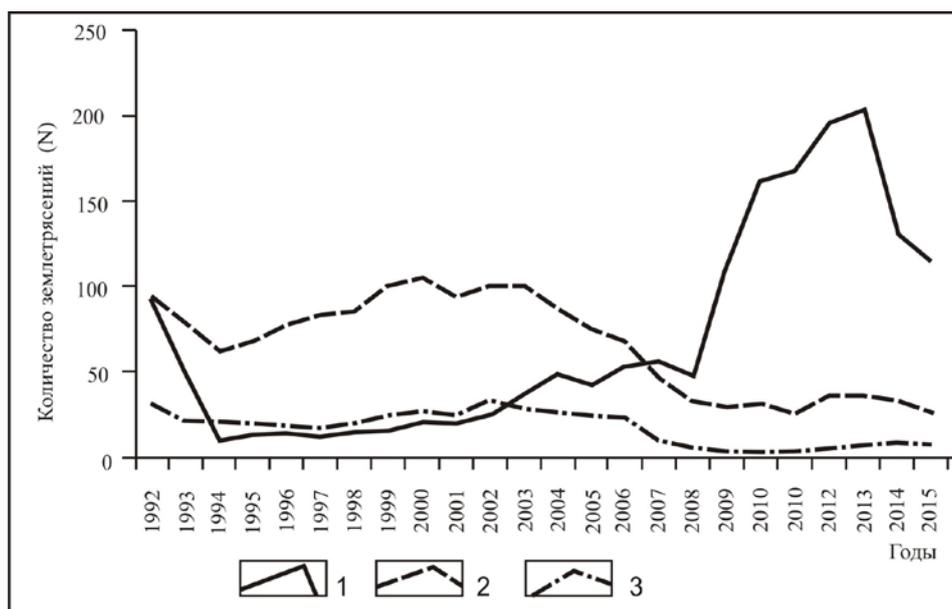


Рис. 6. Временные ряды количества землетрясений Кавказско-Загросского фланга АЕКО: для уровней глубины до 15 км (1), от 15 до 40 км (2) и от 40 до 100 км (3). Скользящее осреднение годового числа землетрясений по пяти годам и сдвигом в один год по данным с 1973 по 2018 г. $M \geq 4,5$. На горизонтальной оси указан год середины 5-летнего интервала (по данным [10])

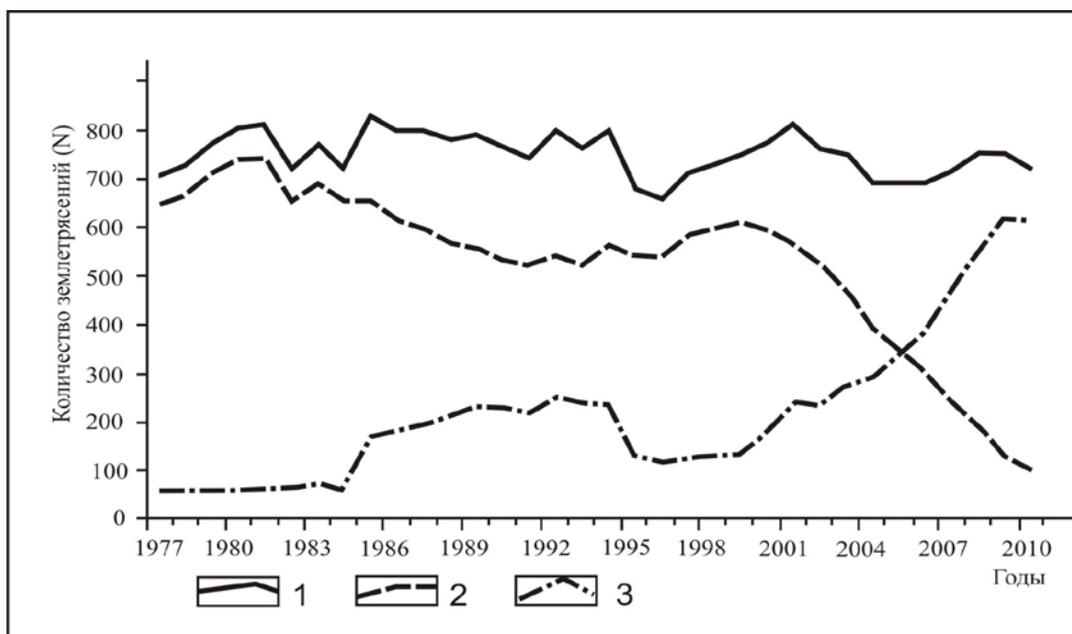


Рис. 7. Временные ряды количества землетрясений Иранского региона в целом (1) и для уровней глубины до 25 км (2) и более 25 км (3). Скользящее осреднение годового числа землетрясений по десяти годам и сдвигом в один год по данным с 1973 по 2015 г. $M \geq 4,5$. На горизонтальной оси указан 5-й год 10-летнего интервала, коэффициент корреляции для временных рядов событий, произошедших на глубинах до и более 25 км, $Q_{23} = -0,97$ (по [5])

Байкальская рифтовая система. Байкальская рифтовая система (БРС) является структурой континентального рифтогенеза, развивающейся в обстановке растяжения и сдвига, обусловленного вращением Амур-

ской плиты по часовой стрелке. На северо-восток ее продолжает Олекмо-Становая зона разломов со сдвиговой кинематикой. Сопоставление временных вариаций сейсмичности этих крупных структур показывает их согла-

сованный характер и подтверждает наличие единого управляющего начала. При этом для землетрясений небольших глубин до 20 км намечается общий тренд к активизации к началу XXI в., возможно, обусловленный активизацией добычи углеводородов на южной периферии Восточно-Сибирской платформы [1].

Спрединговый хребет Книповича и сейсмичность Балтийского щита. Происхождение современной сейсмичности Балтийского щита долгое время оставалось предметом дискуссий. Одни исследователи полагали, что современная активность этого относительно стабильного блока литосферы связана с гля-

циоизостатическими деформациями, другие связывали ее с процессами спрединга в районе хребта Книповича – северного продолжения Срединно-Атлантического хребта. В последнее время все больше склоняются в пользу последней версии. Сравнительный анализ временных рядов, отражающих вариации сейсмичности в районе хребта Книповича и в пределах Балтийского щита, показал их противофазную корреляцию, которая свидетельствует в пользу наличия обратной взаимосвязи проявлений сейсмичности этих структур (рис. 8).

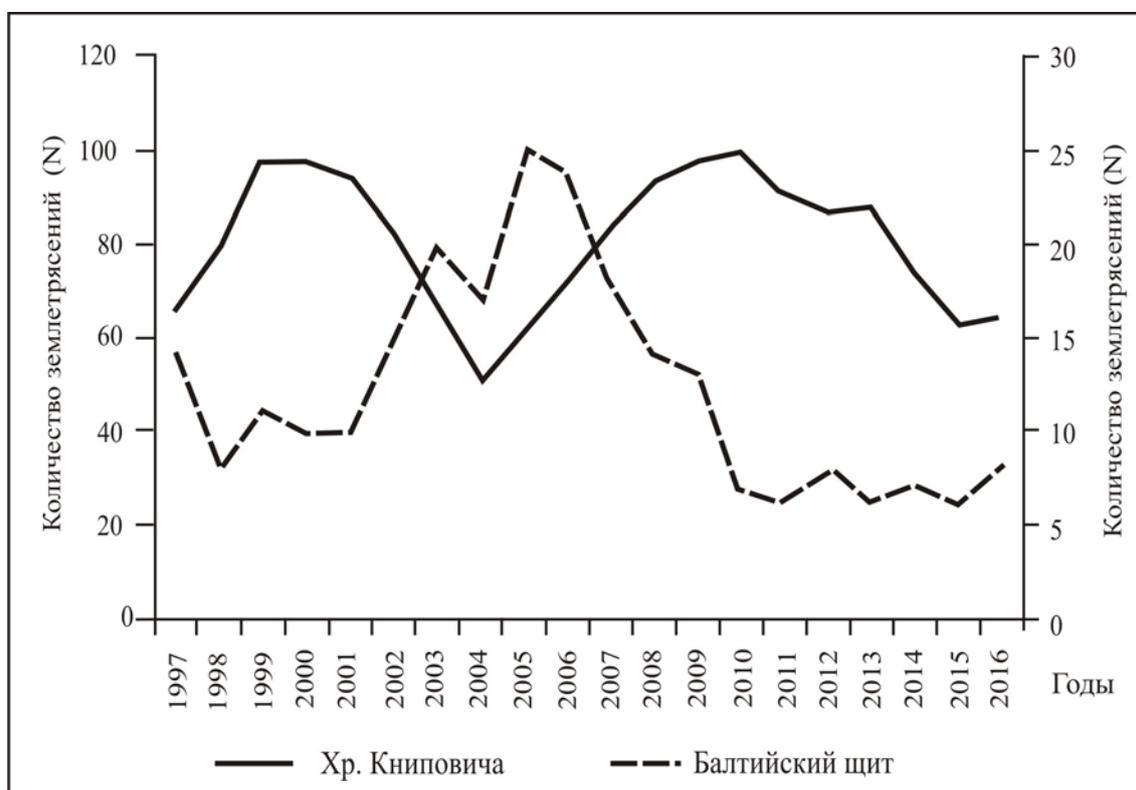


Рис. 8. Временные ряды количества землетрясений хребта Книповича и Балтийского щита.

Скользящее осреднение годового числа землетрясений по пяти годам и сдвигом в один год по данным с 1995 по 2018 гг. На горизонтальной оси отмечены годы середины 5-летнего интервала. Минимальная магнитуда выборки для хр. Книповича $M_{\min} \geq 4,5$, для Балтийского щита $M_{\min} \geq 3$ (ось справа). Коэффициент корреляции временных рядов $Q = -0,41$

Выводы

На основе анализа временных вариаций сейсмичности в пределах основных мегаструктур Земли выявлен ряд общих особенностей, характерных для различных геодинамических обстановок. Отмечена согласованность в изменении числа землетрясений смежных горизонтов литосферы на одинаковых глу-

бинных уровнях, в особенности очевидная для глубокофокусных событий. Для большинства исследованных регионов обнаружена противофазность для вариаций активности землетрясений верхней коры и более глубоких горизонтов. Важной особенностью является также, в основном, согласованное синфазное или противофазное изменение сейсмичности для регионов, в современном геодинамиче-

ском развитии которых доминирует единый процесс, будь то обстановка коллизии, субдукции, рифтогенеза или спрединга. По-видимому, долговременные вариации сейсмичности следует рассматривать как результат влияния этого управляющего процесса и по ним оценивать ослабление или усиление его интенсивности, а также с помощью парной корреляции выявлять динамически взаимосвязанные регионы.

Общей особенностью для временных рядов землетрясений верхней коры в различных регионах Земли является их тренд на увеличение активности, который связан, очевидно, с тотальным ростом масштабов и интенсивности техногенных воздействий в сейсмоактивных областях. Установлено, что верхнекоровые, нижнекоровые и мантийные землетрясения в различных геодинамических обстановках чаще всего ведут себя относительно обособленно или противофазно по отношению к соседним активным уровням и, в то же время, в большинстве случаев выступают согласованно по латерали. Близкое совпадение временных вариаций для определенных уровней позволяет говорить о согласованном автономном развитии отдельных оболочек литосферы, которое объясняется, возможно, различиями вещественного состава и физико-механических свойств отдельных геосфер, а также особенностями их реакции на внешние природные и техногенные воздействия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Архипова, Е. В. Сейсмичность как индикатор системного геодинамического взаимодействия тектонических структур литосферы / Е.В. Архипова, О.В. Анисимова, А.Д. Жигалин, И.С. Гусева // Глубинное строение, минерагения, современная геодинамика и сейсмичность Восточно-Европейской платформы и сопредельных регионов [Текст]: материалы Всероссийской конференции с международным участием (г. Воронеж – 25–30 сентября 2016 г.) / под ред. Н.М. Чернышова, Л.И. Надежка. – Воронеж : Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2016. – С. 59–62.
2. Архипова, Е. В. Временные вариации сейсмичности как индикатор системного сейсмогеодинамического развития регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока / Е.В. Архипова, А.Д. Жигалин, И.С. Гусева // Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна». – 2016. – № 1 (33). – С. 3–11
3. Архипова, Е. В. Современный сейсмогеодинамический режим островодужной окраины Тихого океана / Е.В. Архипова, А.Д. Жигалин, И.С. Гусева // Тектоника современных и древних океанов и их окраин. Материалы XLIX Тектонического совещания, посвященного 100-летию академика Ю.М. Пушаровского. – Москва : ГЕОС, 2017. – С. 22–28.
4. Горькавый, Н. Н. О глобальной составляющей сейсмического процесса и ее связи с наблюдаемыми особенностями вращения Земли / Н.Н. Горькавый, Ю.А. Трапезников, А.М. Фридман // Докл. АН. 1994. – Т. 338, № 4. – С. 525–527.
5. Короновский, Н. В. Структурно-геоморфологический анализ и сейсмичность Иранского региона / Н.В. Короновский, Г.В. Брянцева, Е.В. Архипова, О.В. Анисимова // Бюлл. МОИП. Отд. геол. – 2017. – Т. 92, № 3. – С. 12–22.
6. Короновский, Н. В. Структурно-геоморфологический анализ и сейсмичность Афганского региона / Н.В. Короновский, Г.В. Брянцева, Е.В. Архипова, О.В. Анисимова // Бюлл. МОИП. Отд. геол. – 2017. – Т. 92, № 2. – С. 21–31.
7. Миронов, А. П. Деформационные процессы в литосфере, сильнейшие землетрясения и глобальная геодинамика Земли / А.П. Миронов, Л.А. Латынина, В.К. Милуков. – URL: <http://Infm1.sai.msu.ru/grav/russian/life/chteniya/sagit2009/mirinov.pdf> (дата обращения: 16.03.2019).
8. Моги, К. Предсказание землетрясений / К. Моги. – Москва : Мир, 1988. – 382 с.
9. United States Nuclear Tests; July 1945 through September 1992. DOE/NV--209-REV 16, September 2015. – 129 с.
10. Earthquake Data Base United States Geological Survey. – URL: <http://earthquake.usgs.gov> (дата обращения: 09.01.2019).
11. Nikolaev, A. V. The effect of Mass Bombing Attacks on Seismicity / A.V. Nikolaev, E.V. Arkhipova, A.D. Zhigalin, L.I. Morozova // European Seismological Commission 33rd General Assembly 19–24 August 2012, Moscow, Russia. Oral presentation, Program of Assembly. – P. 59.