

Е. В. Архипова, А. Д. Жигалин, И. С. Гусева

Временные вариации сейсмичности как индикатор системного сейсмогеодинамического развития регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока

На основе данных выборок из каталога USGS в период с 1973 по 2014 гг. построены временные ряды, отражающие вариации активности землетрясений в пределах регионов Дальнего Востока и Восточной Сибири. Выяснилось, что для временного хода землетрясений этих регионов прослеживается синхронизация периодов пиковой активности, которая в наибольшей степени характерна для отдельных сейсмоактивных уровней. Выявленная синхронизация свидетельствует о наличии системного единства проявлений сейсмичности на северо-востоке Евразии. Полученные данные важны для среднесрочного прогноза сейсмической опасности и своевременного принятия мер для предупреждения природных и природно-техногенных катастроф.

Ключевые слова: временные вариации числа землетрясений, сейсмическая опасность, каскадное развитие природно-техногенных процессов.

Об авторах

Архипова Елена Витальевна — кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры экологии и наук о Земле Государственного университета «Дубна».

Жигалин Александр Дмитриевич — кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН), доцент кафедры экологии и природопользования Российского государственного геологоразведочного университета им. С. Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ).

Гусева Ирина Сергеевна — магистр кафедры экологии и наук о Земле Государственного университета «Дубна».

Геоэкологические проблемы, связанные с освоением регионов

В первые десятилетия XXI в. структура национальной экономики России переориентируется на интенсивное развитие Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР). Государственная программа «Социально-экономическое развитие Дальнего Востока и Байкальского региона на период до 2025 года» предусматривает развитие потенциала региона в таких направлениях, как расширение добычи минерального сырья, строительство крупных инфраструктурных объектов — магистрального газопровода «Сила Сибири», железнодорожной магистрали, электростанций, расширение транспортной сети.

В связи с истощением углеводородных месторождений Западной Сибири особое значение приобретает Восточно-Сибирская нефтегазоносная провинция, которая вклю-

чает Красноярский край, Республику Саха (Якутия) и Иркутскую область. В «Энергетической стратегии России на период до 2020 года», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации № 1234-р от 28 августа 2003 г., указывается на необходимость перераспределения добычи углеводородов из Западной Сибири по другим регионам страны и, в частности, в пределы Восточной Сибири. Большинство месторождений этого региона открыты еще в 70-е гг. XX в., но их разработка не производилась из-за сурового климата, сложного геологического строения и высокой твердости древних нефтеносных пород кембрийского, вендского и позднерифейского возраста, а также из-за пространственной разобщенности отдельных месторождений, неразвитой транспортной инфраструктуры и недостатка персонала.

В соответствии с Программой создания в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке единой системы добычи, транспортировки газа и газоснабжения с учетом экспорта газа на рынки Китая и других стран

АТР объемы добычи нефти в Восточной Сибири и Якутии с 2005 до 2020 гг. должны увеличиться в 20 раз. С 1999 г. происходит наращивание добычи углеводородов в районе Иркутского амфитеатра Восточной Сибири, и в первое десятилетие XXI в. объем добычи нефти и газоконденсата резко возрастает. Добыча нефти в Иркутской области в 2006 г. составляла 0,157 млн тонн, а в 2010 г. она достигает уже 5,8 млн тонн. Общая протяженность скважин поискового бурения увеличивается с 14 тыс. м в 2006 г. до 29,15 тыс. м в 2010 г., разведочного бурения — с 3,17 до 22,45 тыс. м соответственно [6]. Определяющая роль в активизации нефтедобычи в Восточной Сибири принадлежит прокладке нефтепровода «Восточная Сибирь — Тихий Океан» (ВСТО), первая очередь которого запущена в октябре 2009 г. Наиболее близко к сейсмоактивной Байкальской рифтовой зоне (БРС), на расстоянии около 500 км к северо-западу от северной оконечности оз. Байкал, расположено Ярактинское месторождение нефти и газоконденсата. Энергетической стратегией предусмотрено также освоение открытого в 1987 г. Ковыктинского газоконденсатного месторождения в Иркутской области. Месторождение расположено в 350 км к северо-востоку от г. Иркутск и неподалеку от впадины Среднего Байкала — наиболее сейсмоопасного участка БРС, где 9-балльные зоны располагаются вдоль линии дельта р. Селенги — о. Ольхон. Вблизи месторождения планируется строительство крупного подземного хранилища газа.

Освоение регионов Дальнего Востока и Восточной Сибири осложняется тем, что эти территории относятся к области интенсивной современной геодинамической активности и широкого распространения потенциально опасных геологических процессов, способных повлиять на сохранность инженерных сооружений и коммуникаций, объектов повышенной опасности. Наиболее значимым фактором эндогенной активности является сейсмичность. Землетрясения, в особенности сильные, способны причинить ощутимый ущерб, связанный с разрушением материальных объектов, гибелью людей, химическим загрязнением окружающей среды, каскадной активизацией опасных экзогенных природных и природно-техногенных процессов. Среди экзогенных геологических процессов наиболее потенциально опасными

представляются лавины и сели п-ова Камчатка и о. Сахалин; в долине р. Лена и в гг. Олёкминск и Ленск широко распространены карстовые процессы; на севере Камчатского п-ова и в Восточной Сибири заметно проявляются геокриологические процессы.

Активная добыча нефти и газа, строительство подземных хранилищ могут привести к нарушению геодинамического равновесия и спровоцировать проявление индуцированных землетрясений. Чуткая реакция геологической среды на внешние воздействия в Восточной Сибири известна по возникновению наведенной сейсмичности в результате создания системы водохранилищ Байкало-Ангарского каскада [1; 3]. Дискуссионным остается вопрос о природе Нефтегорского землетрясения 1995 г. на о-ве Сахалин. Исследование сейсмичности регионов и выявление пространственно-временных закономерностей ее поведения является первоочередной задачей, направленной на сокращение ущерба от прямых и косвенных эффектов, связанных с землетрясениями.

Современные геодинамические обстановки проявлений сейсмичности

Природа сейсмичности регионов Дальнего Востока и Восточной Сибири имеет свои специфические особенности, связанные со строением и геодинамическим развитием отдельных территорий, а также с современными сеймотектоническими процессами. Байкальская рифтовая система (БРС) возникла на месте Саяно-Байкальского сводового поднятия в южной краевой части Восточно-Сибирской платформы под действием активных тектонических движений, начавшихся в эоцене-олигоцене и продолжающихся в настоящее время. Главная впадина БРС, а также ее западные, восточные и юго-восточные высокие горные хребты расположены над прочной и достаточно мощной литосферой окраины Сибирской платформы. Современное развитие сейсмического Саяно-Байкальского пояса происходит в условиях СЗ-ЮВ растяжения и сопровождается сейсмогенными подвижками по разломам сложной кинематики с преобладающим сбросо-сдвиговым компонентом. Сейсмоявления в районе Иркутского амфитеатра Восточно-Сибирской платформы и БРС связаны с формированием протяженной межблоковой границы на юге Сибирского кратона и сосредоточены в диапазоне глубин до

40 км [4]. Высокая геодинамическая активность БРС подтверждается также газовыми эманациями в зонах разломов и проявлениями гидротермальной активности.

Олекмо-Становая зона разломов (ОСЗ) расположена на территории Алдано-Станового региона, протягивается субширотно с запада на восток и представляет собой зону многочисленных сейсмоактивных сдвигов северо-западного и северо-восточного простирания. Формирование мегаструктур БРС и ОСЗ связывают с единым процессом сжатия и поворота Амурской микроплиты по часовой стрелке, в связи с которым к северо-западу от Амурской микроплиты, в пределах БРС, реализуется обстановка растяжения и сдвига, а к юго-востоку, в пределах ОСЗ, — обстановка сжатия и сдвига [2].

Сейсмоактивные структуры Курило-Камчатской островной дуги сформировались в процессе поддвига Тихоокеанской литосферной плиты под Евроазиатскую. Связанные с этим процессом сейсмопроявления рассредоточены в широком диапазоне глубин, формируя сейсмофокальную зону с отчетливым максимумом числа очагов на уровне нижней коры. Сейсмическая активность о-ва Сахалин на уровне коры связана с зонами продольных взбросов и сбросов субмеридионального простирания, разделяющих хребты и межгорные впадины, и поперечных, трансорогенных левых сдвигов северо-западного простирания и правых сдвигов северо-восточного простирания. Глубокофокусные землетрясения о. Сахалин, по-видимому, связаны с продолжающейся на запад Курило-Камчатской сейсмофокальной зоной [4].

Несмотря на весьма существенные различия структурного плана, кинематических характеристик активных разломов, пространственной локализации очагов землетрясений и особенностей геодинамического развития, сравнительный анализ временных вариаций сейсмичности главных мега-

структур Дальнего Востока и Восточной Сибири позволяет обнаружить в современном сейсмотектоническом развитии этих регионов признаки системного единства.

Методика и результаты исследования временных вариаций сейсмичности

Для оценки временных тенденций в изменении сейсмичности на основе каталога *USGS* были сформированы выборки сейсмических событий с магнитудой от 4 за период с 1973 по 2014 гг. для БРС, ОСЗ, п-ова Камчатки, Курильских о-вов и о-ва Сахалин [5]. По данным выборок построены временные ряды пятилетних и годовых сумм землетрясений, а также ряды пятилетних сумм землетрясений со скользящим осреднением и сдвигом в один год (рис. 1—7). Подобные ряды рассчитаны как для регионов в целом, так и для отдельных наиболее сейсмоактивных горизонтов на уровне верхней коры (10—15 км), нижней коры (30—35 км), верхней мантии (>100 км). Их сопоставление позволило выявить регионы с синхронным или близким по времени изменением сейсмичности, а также уровни литосферы, в пределах которых вариации сейсмичности дают основание предполагать наличие единого «управляющего начала».

Временные ряды годовых сумм землетрясений

При сопоставлении временных рядов годовых сумм землетрясений оказалось, что близкое совпадение намечается только в двух случаях — для Олекмо-Становой зоны разломов и Байкальской рифтовой системы на уровне верхней коры с коэффициентом корреляции $Q = 0,75$ (см. рис. 1) и для временных рядов нижнекоровых землетрясений Курильских о-вов и о. Сахалин — с $Q = 0,8$ (см. рис. 2). Близкий годовой ход количества землетрясений этих регионов для каждого из случаев обусловлен, по-видимому, сходством геодинамических условий протекания сейсмического процесса.

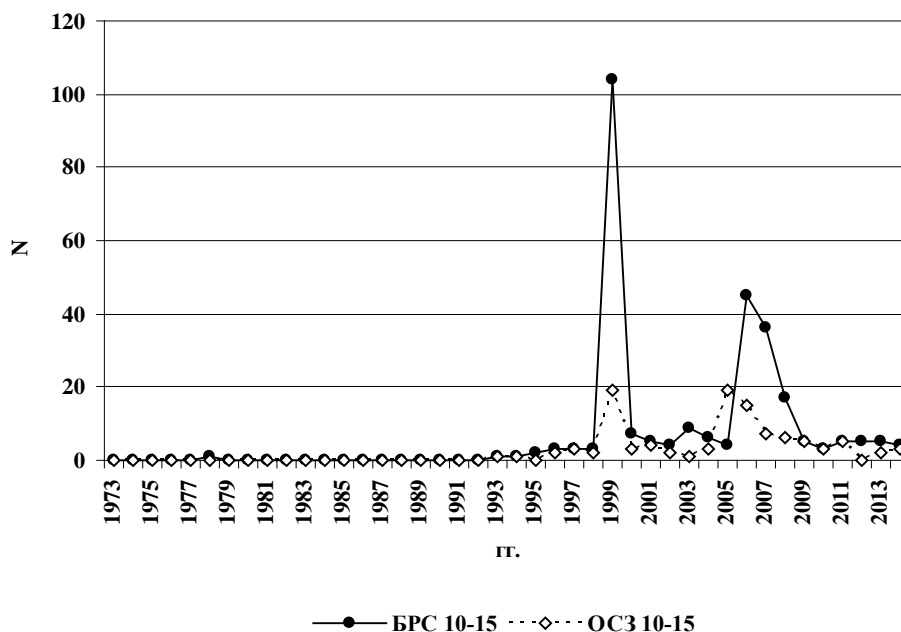


Рис. 1. Изменение годового количества землетрясений на уровне верхней коры с 1973 по 2014 гг. $Q = 0,75$

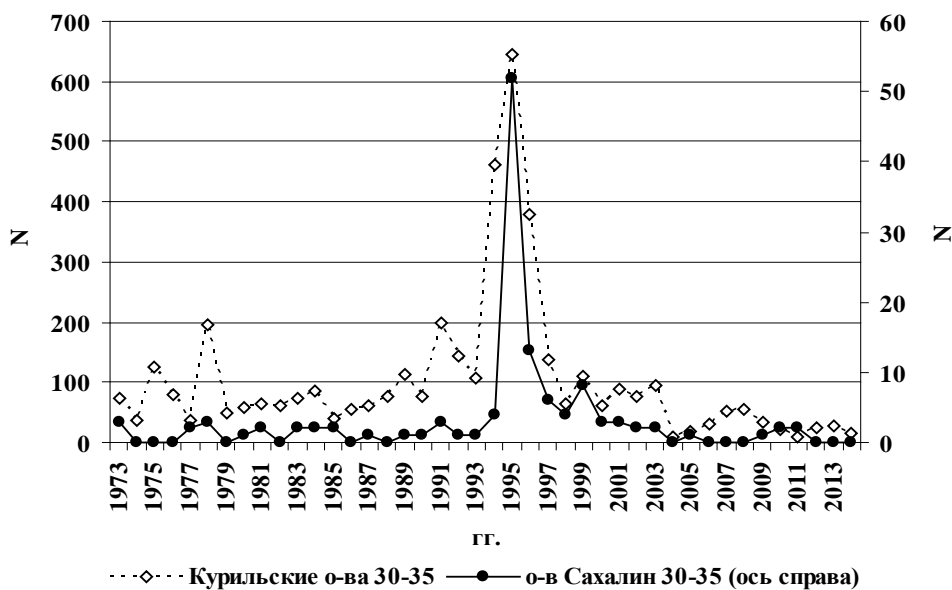


Рис. 2. Изменение годового количества землетрясений на уровне нижней коры с 1973 по 2014 гг. $Q = 0,8$

Временные ряды пятилетних сумм землетрясений

При сопоставлении временных рядов пятилетних сумм выявлено 7 высоких коэффициентов корреляции со значениями от 0,65 до 0,98 (табл. 1), что свидетельствует о совпадении долговременных тенденций в изменении числа землетрясений для большинства регионов как на уровне нижней, так и на уровне верхней коры. Графики времен-

ных рядов на рис. 3 и 4 демонстрируют высокое совпадение тенденций в пределах каждого из этих уровней, однако поскольку ряды имеют малое количество точек, в данном случае их не стоит рассматривать как значимые и можно использовать лишь для приблизительной качественной оценки тенденций в изменении активности землетрясений.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции пятилетних сумм землетрясений на уровнях максимальной активности

	БРС 10—15 км	п-ов Кам- чатка 30—35 км	Курильские о-ва 10—15 км	Курильские о-ва 30—35 км	ОСЗ 10—15 км	ОСЗ 30—35 км	о. Сахалин 10—15 км	о. Сахалин 30—35 км
БРС 10—15 км		-0,08	0,54	-0,27	0,92	0,20	0,97	-0,07
п-ов Камчатка 30—35 км	-0,08		-0,25	0,96	-0,14	0,48	0,06	0,98
Курильские о-ва 10—15 км	0,54	-0,25		-0,27	0,78	-0,50	0,65	-0,22
Курильские о-ва 30—35 км	-0,27	0,96	-0,27		-0,27	0,39	-0,11	0,95
ОСЗ 10—15 км	0,92	-0,14	0,78	-0,27		-0,14	0,95	-0,09
ОСЗ 30—35 км	0,20	0,48	-0,50	0,39	-0,14		0,13	0,38
о. Сахалин 10—15 км	0,97	0,06	0,65	-0,11	0,95	0,13		0,08
о. Сахалин 30—35 км	-0,07	0,98	-0,22	0,95	-0,09	0,38	0,08	

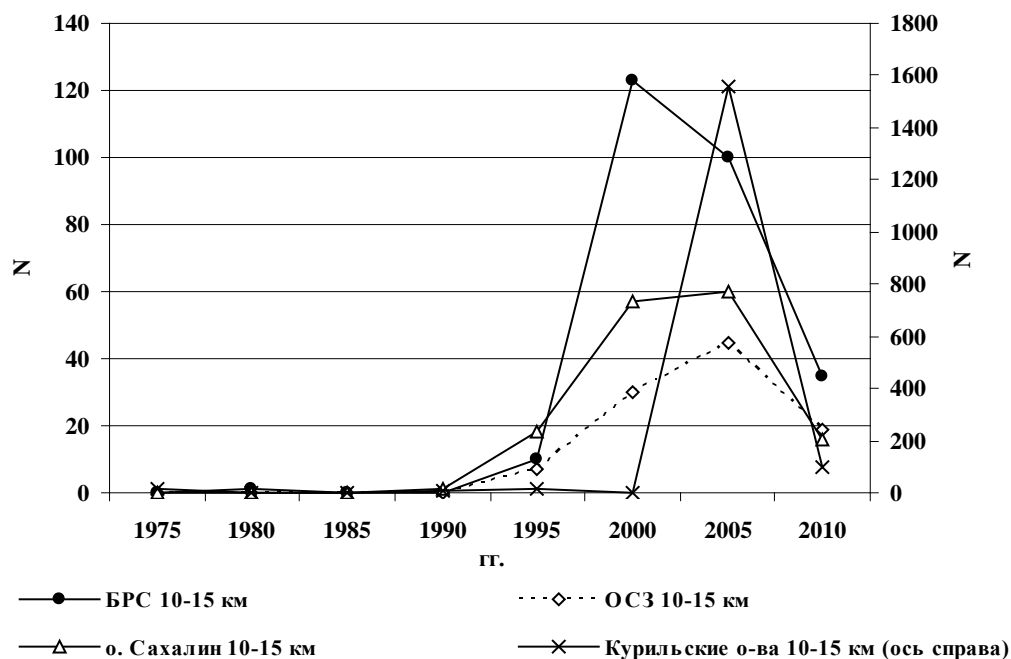


Рис. 3. Вариации пятилетних сумм землетрясений на уровне верхней коры с 1973 по 2012 гг. (на горизонтальной оси обозначена середина пятилетнего интервала)

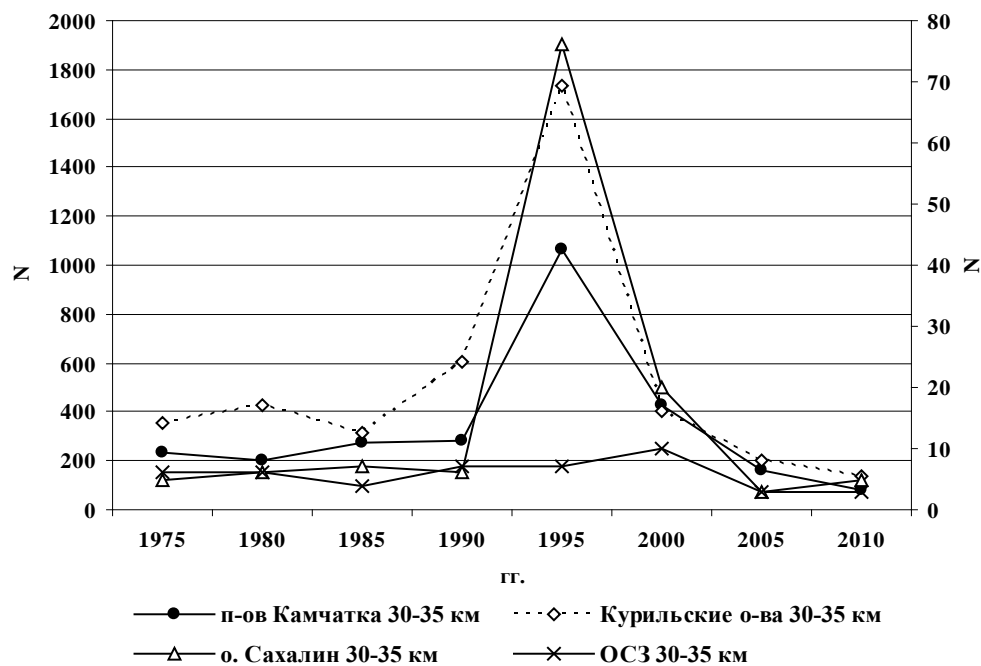


Рис. 4. Вариации пятилетних сумм землетрясений на уровне нижней коры с 1973 по 2012 гг. (на горизонтальной оси обозначена середина пятилетнего интервала)

Временные ряды землетрясений со скользящим осреднением по 5 годам. Сопоставлением годового количества землетрясений с 1973 по 2014 гг. со скользящим осреднением по 5 годам и сдвигом в 1 год

выявлено более трети высоких значимых коэффициентов корреляции, которые подтверждают близкое совпадение долговременных вариаций сейсмичности регионов на каждом из уровней (табл. 2, 3, рис. 5—7).

Таблица 2. Коэффициенты корреляции годовых сумм землетрясений со скользящим осреднением по пяти годам на уровнях максимальной активности в пределах верхней и нижней коры

	БРС 10—15 км	п-ов Камчатка 30—35 км	Курильские о-ва 10—15 км	Курильские о-ва 30—35 км	ОСЗ 10—15 км	ОСЗ 30—35 км	о. Сахалин 10—15 км	о. Сахалин 30—35 км
БРС 10—15 км		0,26	0,54	-0,14	0,89	0,21	0,85	0,1
п-ов Камчатка 30—35 км	0,26		-0,33	0,7	0,05	0,73	0,1	0,82
Курильские о-ва 10—15 км	0,54	-0,33		-0,31	0,77	-0,4	0,54	-0,24
Курильские о-ва 30—35 км	-0,14	0,7	-0,31		-0,24	0,37	-0,18	0,92
ОСЗ 10—15 км	0,89	0,05	0,77	-0,24		-0,08	0,86	-0,03
ОСЗ 30—35 км	0,21	0,73	-0,4	0,37	-0,08		-0,05	0,46
о. Сахалин 10—15 км	0,85	0,1	0,54	-0,18	0,86	-0,05		0,02
о. Сахалин 30—35 км	0,1	0,82	-0,24	0,92	-0,03	0,46	0,02	

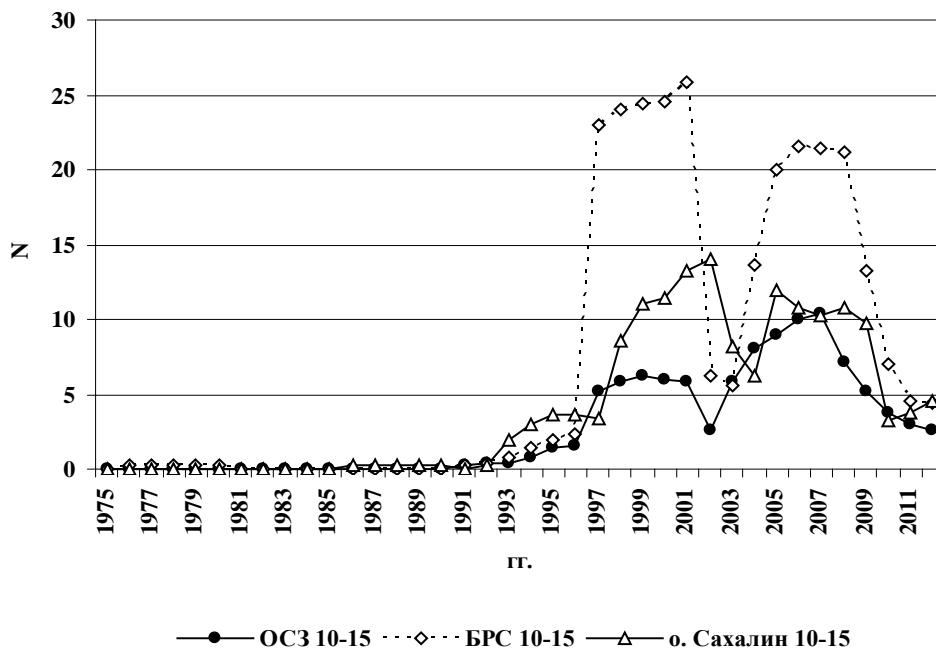


Рис. 5. Вариации количества верхнекоровых землетрясений с 1973 по 2014 гг. со скользящим осреднением по 5 годам, сдвиг 1 год (на горизонтальной оси обозначена середина пятилетнего интервала)

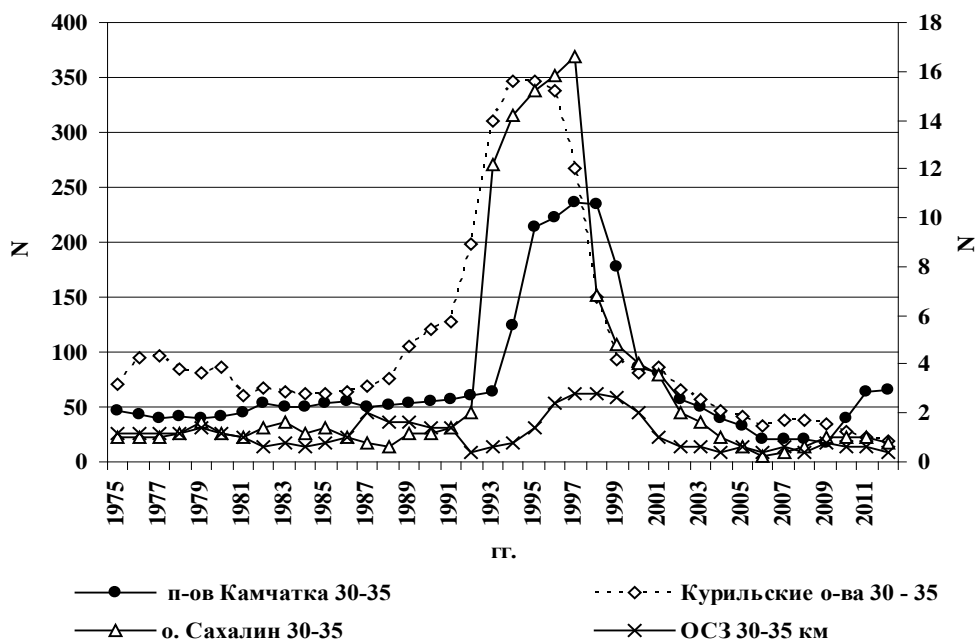


Рис. 6. Вариации количества верхнекоровых землетрясений с 1973 по 2014 гг. со скользящим осреднением по 5 годам, сдвиг 1 год (на горизонтальной оси обозначена середина пятилетнего интервала)

Таблица 3. Коэффициенты корреляции годовых сумм землетрясений со скользящим осреднением по пяти годам для временных рядов мантийных землетрясений с глубинами очагов более 100 км

	п-ов Камчатка	Курильские о-ва	о. Сахалин
п-ов Камчатка		0,98	0,96
Курильские о-ва	0,98		0,94
о. Сахалин	0,96	0,94	

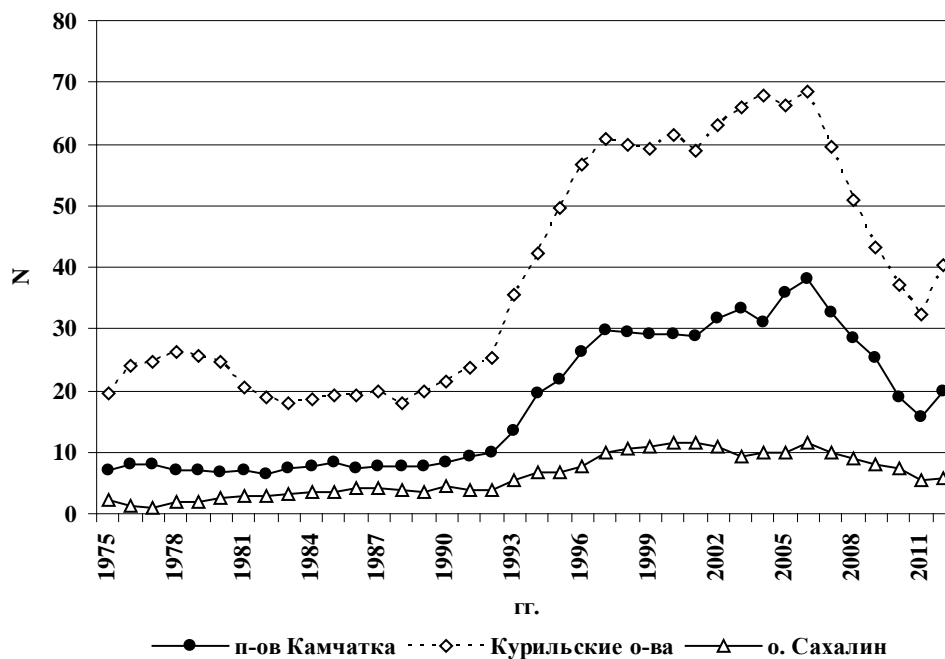


Рис. 7. Вариации количества мантийных землетрясений регионов в обрамлении Северо-Западной Пацифики с 1973 по 2014 гг. со скользящим осреднением по 5 годам, сдвиг 1 год; $h \geq 100$ км, $M \geq 4$ (на горизонтальной оси обозначена середина пятилетнего интервала)

Обсуждение результатов и выводы

При сопоставлении временных рядов числа землетрясений, построенных в разных масштабах осреднения, выяснилось, что распределение сейсмических событий во времени неравномерно. Отмечаются как периоды относительных затиший, так и периоды пиковой активизации, которые возможно синхронизировать. Наличие синхронных всплесков для определенных регионов и уровней литосферы свидетельствует, что вариации сейсмичности не являются хаотичными автоколебаниями — они представляют собой отчетливый «пульс» современных геодинамических процессов.

Наиболее впечатляющим оказалось сопоставление временных рядов пятилетних сумм землетрясений на различных глубинных уровнях (см. табл. 1, рис. 1, 2). Выяснилось, что при данном масштабе осреднения одновременная активизация и затухание активности землетрясений наблюдается в период с 1998 по 2007 гг. для БРС, ОСЗ, о. Сахалин и Курильских о-вов на уровне верхней коры (см. рис. 3). Для нижней коры такая активизация начинается несколько раньше, с 1993 и завершается в 2002 г., одновременно для о-ва Сахалин, п-ва Камчатка и Курильских о-вов (см. рис. 4). Тенденции, намеченные для пятилетних сумм, подтверждаются

и при сопоставлении годового хода землетрясений со скользящим осреднением по 5 годам (табл. 2, 3, рис. 5—7). В особенности близкое совпадение характерно для мантийных землетрясений Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны и о. Сахалин, мантийные землетрясения которого локализуются на продолжении этой зоны в направлении Евразийского континента.

Выявленная синхронность сейсмических вариаций свидетельствует о наличии тесной взаимосвязи геодинамических процессов, управляющих развитием этих крупных сейсмоактивных объемов литосферы и проявляющих себя в синхронных вариациях на уровне отдельных сейсмоактивных горизонтов. В плане сейсмической активизации каждая из оболочек ведет себя согласованно и независимо от смежных. Вместе с тем, периоды активизации для каждой из оболочек не совпадают и возможны ситуации, когда высокая активность на одном из уровней «накладывает запрет» на активизацию смежных уровней. Полученная информация может быть использована для среднесрочного прогноза сейсмической опасности рассмотренных регионов Дальнего Востока и Восточной Сибири и своевременного принятия мер для предупреждения природных и природно-техногенных катастроф, связанных с увеличением активности землетрясений.

Библиографический список

1. Голенецкий, С. И. Наведенная сейсмичность в районе Иркутского водохранилища у юго-западной оконечности озера Байкал / Геология и геофизика. — 1997. — Т. 38, № 10. — С. 1692—1698.

2. Имаев, В. С. Сейсмоструктура Олекмо-Становой сейсмической зоны (Южная Якутия) / В.С. Имаев, Л.П. Имаева, Б.М. Козьмин // Литосфера. — 2005. — № 2. — С. 21—40.

3. Павленов, В. А. Проблемы наведенной сейсмичности Ангарского каскада ГЭС / В.А. Павленов, Е.Н. Черных // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии : сборник статей. Вып. 1. Ин-т

зем. коры СО РАН. — Иркутск : Изд-во Ин-та зем. коры СО РАН, 2004. — С. 190—196.

4. Семинский, К. Ж. Сейсмичность юга Сибирской платформы: пространственно-временная характеристика и генезис / К.Ж. Семинский, Я.Б. Радзиминович // Физика Земли. — 2007. — № 9. — С. 18—30.

5. <http://earthquake.usgs.gov> — Мировой каталог землетрясений Геологической службы США (Earthquake Data Base USGS). — Электрон. дан. — URL: <http://earthquake.usgs.gov> (дата обращения: 08.09.2015 г.).

6. Они были первыми // Нефть и капитал. 2007. — № 4. — Электрон. дан. — URL: http://www.oilcapital.ru/edition/nik/archives/nik_2006/nik_04_2007/107441/public/107481.shtml (дата обращения: 07.10.2015 г.).

*Поступила в редакцию
25.03.2016*