

УДК 550.24

ТЕХНОГЕННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КАК ТРИГГЕР СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВИЗАЦИИ ВЕРХНИХ ГОРИЗОНТОВ ЛИТОСФЕРЫ

Жигалин А.Д.^{1,2}, Архипова Е.В.³, Брянцева Г.В.¹, Анисимова О.В.³, Гусева И.С.³

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, *zhigalin.alek@yandex.ru*

²Институт физики Земли РАН, Москва

³Государственный университет «Дубна», г. Дубна

Введение

С развитием техносферы возрастает общее количество, площадное распространение и интенсивность техногенных воздействий, провоцирующих сейсмический отклик геологической среды. Формирование запасов упругой энергии происходит в ходе глобальных геодинамических процессов, связанных с взаимодействием литосферных плит и реализуется в ходе сейсмического процесса, который может протекать как самопроизвольно, так и под влиянием природных и техногенных «триггеров» – относительно слабых воздействий, способных активизировать метастабильные сейсмогеодинамические системы и приблизить момент землетрясения в уже «подготовленном» будущем очаге. Техногенные триггеры отличаются значительным разнообразием. В их числе высокоэнергичные воздействия локального характера, такие как подземные испытания ядерного оружия, карьерные и шахтные взрывы, бомбардировки в сейсмоопасных районах с использованием глубинных бомб, боеприпасов объемного взрыва, «ковровые бомбардировки» [2, 3, 9]. К длительным воздействиям, способным активировать относительно спокойные в отношении сейсмичности объемы земной коры, являются такие, как добыча полезных ископаемых шахтным и скважинным способом, использование технологии гидроразрыва пласта при добыче сланцевых углеводородов и доизвлечения запасов из традиционных коллекторов, методы подземной геотехнологической подготовки месторождений, закачка химических и радиоактивных отходов в скважины, работа сейсмических вибраторов, МГД-генераторов и т.д. [6, 7] Постепенно влияние техногенных триггеров приобретает всеобъемлющий характер. Несмотря на то, что они оказывают, в основном, локальное воздействие, по своему энергетическому потенциалу многие из них зачастую мощнее природных и влияют непосредственно на геологическую среду верхних горизонтов коры. Суперпозиция многочисленных воздействий, различных по своему энергетическому потенциалу и длительности, способна вызвать нелинейную реакцию геодинамических систем и привести к перестройке общего стиля накопления и разрядки тектонических напряжений с глобальной активизацией мелкофокусной сейсмичности.

Несмотря на то, что основное большинство сейсмических событий происходит в зонах взаимодействия тектонических плит, различные регионы в пределах этих зон обладают неодинаковым энергетическим потенциалом. Среди наиболее активных выделяются зоны субдукции Тихоокеанского пояса (ТОП), а также зоны максимального сближения плит Альпийско-Гималайского коллизионного пояса (АГП). В качестве менее активных выделяются фланговые участки зон коллизии АГП, а также зоны рифтогенеза, такие как, например, Байкальская рифтовая система (БРС). Зоны с разным энергетическим потенциалом могут по-разному реагировать на триггеры, поэтому для анализа изменения активности землетрясений верхних горизонтов коры выбраны регионы с различным сейсмическим потенциалом и стилем геодинамического развития. Для выявления возможной активизации под влиянием техногенных воздействий проводился анализ сглаженных временных рядов количества землетрясений, а также анализировался спектр потенциальных триггеров сейсмической активизации.

Исходные данные и методика исследований

В качестве объектов исследования выбраны острова Сахалин и Хоккайдо, входящие в состав Сахалино-Японской островной дуги, Курило-Камчатская островная дуга, восточный фланг Аравийско-Евразийской зоны коллизии (АЕКО) и зона коллизии Индостана и Евразии (ИЕКО), а также БРС, которая является одной из основных сейсмогенерирующих структур Евразии и, по существу, представляет собой дивергентную границу в зоне взаимодействия Евразийской и Амурской плит.

Фактическим материалом для проведения исследования стал каталог землетрясений Геологической службы США в интервале с 1973 по 2018 г. [8]. На его основе с использованием графиков повторяемости сформированы выборки сейсмических событий для активных районов. В объем выборок вошли события средней силы начиная с $M_{min} \geq 4.5$, которые, с одной стороны, отражают процессы деструкции в пределах значительных объемов литосферы и, с другой, являются достаточно частыми для того чтобы сформировать статистически значимый объем выборки. Для верхних горизонтов до глубин в 20 км производился расчет временных рядов годового количества землетрясений. Выявление долговременных тенденций производилось на основе анализа рядов с применением скользящего осреднения по 5 годам и сдвигом в один год. С помощью построения линейных трендов намечались общие тенденции в изменении сейсмической активности, в основном, на малых глубинах, затем проводилось сопоставление с хронологией техногенных воздействий, способных спровоцировать увеличение числа землетрясений верхних горизонтов коры.

Полученные результаты и их анализ

Тихоокеанский пояс. В пределах Тихоокеанского пояса анализ трендов изменения сейсмичности верхних горизонтов коры выполнен для его северо-западного сегмента, который включает Курило-Камчатскую островную дугу, о. Сахалин, расположенный в западной части Охотоморской плиты, и о. Хоккайдо, представляющий собой область торцевого сочленения Курило-Камчатской и Сахалино-Японской островных дуг. Геодинамическое развитие этого сегмента проходит в общей обстановке субдукции Тихоокеанской литосферной плиты под островные дуги северо-западного обрамления Тихого океана, а также под влиянием процессов регионального и локального характера, включая спрединг в Охотском море, трансформацию структур под воздействием сжатия и вертикальные движения отдельных блоков.

Проявления сейсмичности северо-западного сегмента Тихоокеанского пояса являются следствием наложения и взаимодействия современных геодинамических процессов различного масштаба. Значительное количество очагов землетрясений о-ва Сахалин происходит на небольших глубинах и приурочено к локальным геологическим структурам типа надвигов, реализующих сжатие в юго-западной части о-ва, связанное с процессами спрединга в Охотском море, а также разломов с правосдвиговой компонентой. Землетрясения на мантийных глубинах происходят реже. Из последних наиболее известно событие с $M = 8.3$, произошедшее в 2013 г. в Охотском море на глубине около 600 км. В пределах Курило-Камчатской зоны очаги землетрясений концентрируются, в основном, вдоль зоны ЗВБ, часть из них связана с активными разломами типа листрических сбросов, появление которых связано с формированием системы продольных ассиметричных поднятий и впадин Центральной Камчатки.

Объединяет структуры о. Сахалин и о. Хоккайдо Хоккайдо-Сахалинский глубинный мегасдвиг, к которому приурочены скопления углеводородов островной части региона. Субдукционная зона вдоль о. Хоккайдо прослеживается как цепь мелкофокусных землетрясений, формирующих сейсмофокальную зону, наклоненную под остров до глубин около 50 км. Возникшую на границе Японского моря и Японских островов конвергентную зону связывают с раскрытием Байкальского рифта [10].

В пределах северо-западного сегмента Тихоокеанского пояса разрабатываются месторождения, каменного и бурого угля, коренного и россыпного золота, самоцветного сырья, полиметаллических руд, строительных материалов, но наиболее интенсивно ведется добыча углеводородов на шельфе о. Сахалин. На базе разведанных месторождений сахалинского шельфа сформированы проекты «Сахалин 1, 2, 3». «Сахалин-1» является одним из крупнейших инвестиционных шельфовых проектов России, предусматривает разработку трех морских месторождений, расположенных на северо-восточном шельфе острова в акватории Охотского моря – Одопту-море, Чайво, Аркутун-Даги. Потенциальные извлекаемые запасы составляют 307 млн т нефти и 485 млрд м³ природного газа. В 1989 году на месторождении Аркутун-Даги пробурена первая нефтяная скважина, а с начала реализации проекта консорциумом «Сахалин-1» пробурено 9 из 10 самых протяженных скважин в мире [4].

Анализ тенденций изменения сейсмичности верхних горизонтов коры для о. Сахалин, о. Хоккайдо и Курило-Камчатской островной дуги показывает, что с момента начала эксплуатации нефтегазовых запасов шельфа о. Сахалин резко возросло количество землетрясений на глубинах до 20 км (рис. 1). Почти одновременно, но менее интенсивно активизировалась сейсмичность малых глубин в районе о. Хоккайдо. Сейсмичность Курило-Камчатской дуги в конце XX - начале XXI вв. также демонстрирует тренд на активизацию верхних горизонтов. При сопоставлении годового

количества землетрясений о. Сахалин с моментом начала эксплуатации месторождения Аркутун-Даги, очевидно, что увеличение активности началось именно с этого времени. Наиболее мощным сейсмическим событием региона стало Нефтегорское землетрясение 1995 г., очаг которого располагался на глубине 18 км. При прогнозируемой для этой зоны интенсивности в 7 баллов, землетрясение оказалось 9-балльным и рассматривается многими сейсмологами в качестве природно-техногенного.

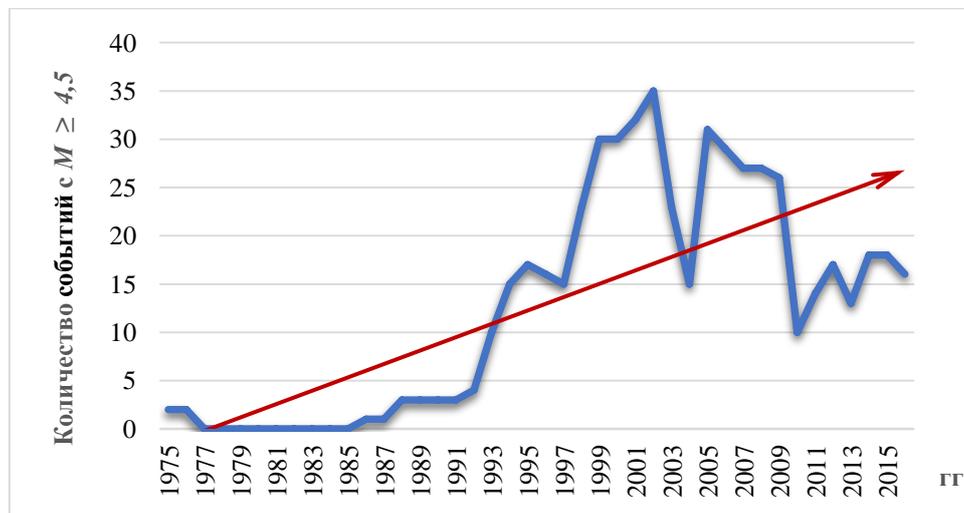


Рис. 1. Изменение годового количества землетрясений о. Сахалин с $M \geq 4.5$ на глубинах менее 20 км с 1973 по 2018 гг. со скользящим осреднением по 5 годам, сдвиг 1 год. Стрелкой показан линейный тренд.

Байкальская рифтовая зона. Байкальская рифтовая зона представляет собой структуру растяжения в условиях всплывания аномально разогретого мантийного диапира на стыке Евразийской и Амурской плит. За счет вращения Амурской плиты по часовой стрелке северо-восточнее растяжение приобретает сдвиговую компоненту, а затем, уже в районе Олекмо-Становой зоны сменяется сжатием и формированием систем взбросов и надвигов со сдвиговой компонентой перемещений. БРС характеризуется высокой сейсмической активностью, возможная интенсивность землетрясений в ее центральной части, в районе оз. Байкал достигает 9 баллов. Очаги землетрясений располагаются неглубоко, и приурочены, в основном к верхним 20 км.

К северу от БРС, в южном обрамлении Восточно-Сибирской платформы, в пределах Ангаро-Ленской ступени и Непско-Ботуобинской антеклизы, располагаются нефтегазоносные провинции, активное освоение запасов которых предусмотрено в качестве одного из основных приоритетов социально-экономического развития на ближайшие десятилетия. В непосредственной близости, к северо-западу от оз. Байкал располагаются Чиканское и Ковыктинское газоконденсатные месторождения. Ковыктинское месторождение, одно из самых крупных газовых месторождений в мире, с запасами около 2 трлн. кубометров газа и более 83 млн. газового конденсата, открыто в 1987 году, его опытно-промышленная эксплуатация началась с 2001 года. Анализ тренда изменения сейсмичности БРС на глубинах до 20 км показывает рост количества землетрясений малых глубин, начиная с конца XX в. (рис. 2). Это время совпадает с началом эксплуатации нефтегазовых запасов юга Восточно-Сибирской платформы, для реализации которых уже построена система магистральных нефтепроводов ВСТО и строится магистральный газопровод «Сила Сибири» [1]. Активизация землетрясений БРС на небольших глубинах, возможно, связана с изменением напряженно-деформированного состояния геологической среды и нарушением флюидного режима геодинамических систем на юге Восточной Сибири.

Альпийско-Гималайский пояс. Развитие современной структуры Альпийско-Гималайского пояса происходит в условиях коллизии Северной Евразии с плитами Гондванской группы. Сейсмоактивные структуры в южном обрамлении пояса объединены с платформенными территориями Северной Евразии в составе единых сейсмогеодинамических систем и оказывают влияние на их геодинамическое развитие. Наиболее интенсивно коллизионные процессы проявляются в пределах зоны сближения Индостана и Аравии.

С конца XX в. многие регионы АГП, по-существу, являлись полигонами для испытания систем новейших вооружений. В 1998 г. велись бомбардировки Ирака, расположенного во фронтальной части Аравийской плиты, в 1999 г. бомбардировки промышленных районов Югославии,

с 2001 г. ведутся боевые действия на западном фланге ИЕКО в Афганистане, в 2011 активно велись бомбардировки Ливии. Наиболее интенсивный сейсмический отклик вызывают «ковровые бомбардировки», применение боеприпасов объемного взрыва, глубинных бомб [9].

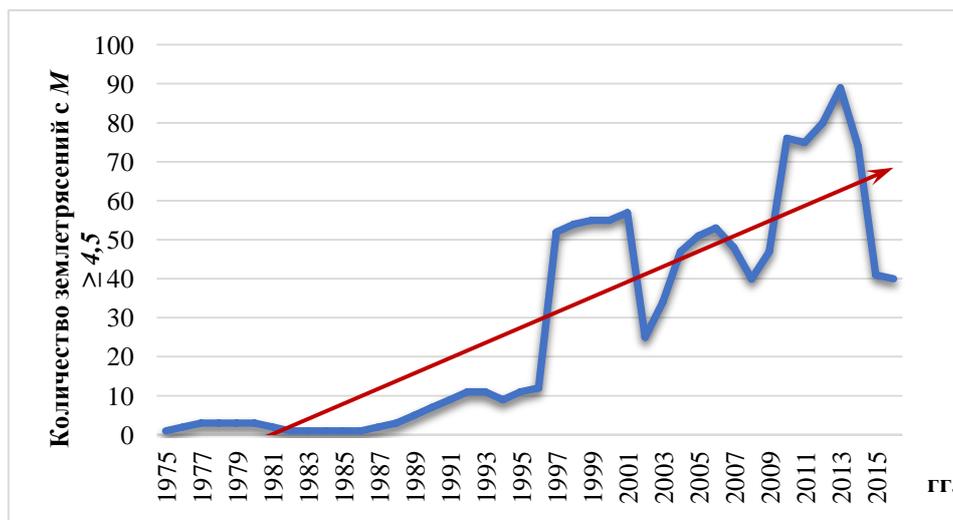


Рис. 2. Изменение годового количества землетрясений БРС с $M \geq 4.5$ на глубинах менее 20 км с 1973 по 2018 гг. со скользящим осреднением по 5 годам, сдвиг 1 год. Стрелкой показан линейный тренд.

График годового количества землетрясений для западного фланга ИЕКО, построенный со скользящим осреднением по 5 гг. для событий с очагами до 20 км, демонстрирует общий тренд на увеличение количества событий при заметном снижении числа землетрясений с глубинами очагов от 20 до 100 км (рис. 4). Резкое увеличение активности западного фланга ИЕКО по времени совпадает с началом военных действий в 2001 г. в Афганистане.

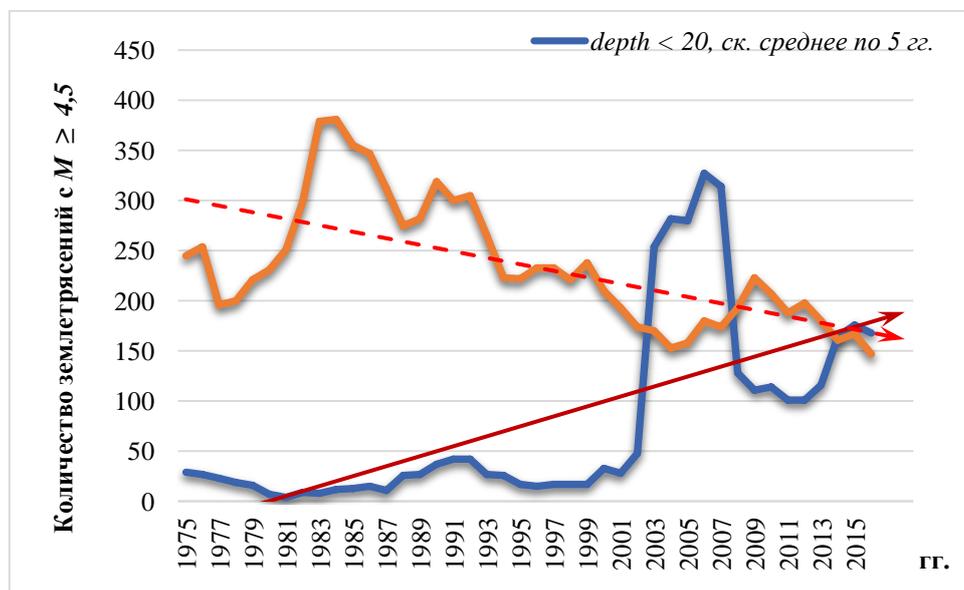


Рис. 3. Изменение годового количества землетрясений ИЕКО с $M \geq 4.5$ на глубинах менее 20 км и на глубинах от 20 до 100 км с 1973 по 2018 гг. со скользящим осреднением по 5 годам, сдвиг 1 год. Стрелками показаны линейные тренды для каждого из графиков.

Выводы

Анализ трендов изменения количества землетрясений верхних горизонтов коры показывает увеличение сейсмической активности на глубинах до 20 км, которое происходит в условиях интенсивных техногенных воздействий. Для регионов северо-западного сектора Тихоокеанского пояса в значительной степени сказывается влияние нефтедобычи на шельфе о. Сахалин, это влияние заметно ощущается также о. Хоккайдо, и, в слабой степени, для Курило-Камчатской дуги. Повидимому, тесная связь проявлений сейсмичности о. Сахалин и о. Хоккайдо, обусловлена тем, что

они объединены в единой структуре Сахалино-Японской островной дуги и геодинамически связаны в единой системе накопления и разрядки тектонических напряжений.

Сейсмичность БРС, в основном, сконцентрирована на небольших глубинах, поэтому говоря об активизации верхних горизонтов до 20 км, можно констатировать общее увеличение активности для этой зоны, совпадающее по времени с началом интенсивной эксплуатации месторождений углеводородов на южной периферии Восточно-Европейской платформы и Иркутского амфитеатра.

Для западного фланга ИЕКО также существует тренд на активизацию сейсмичности верхних горизонтов. Увеличение активности по времени совпадает с началом военных действий в Афганистане, на западном фланге ИЕКО. Этот сегмент пояса обладает наиболее высоким энергетическим потенциалом, и, возможно, оказывает влияние на смежные фланги коллизионных областей, которые объединены с ним в пределах общей сейсмогеодинамической системы АГП. Активизация на малых глубинах происходит на фоне снижения активности землетрясений в интервале от 20 до 100 км. Для временных рядов, отражающих длиннопериодные вариации активности землетрясений на глубинах до 20 км и от 20 до 100 км существует отрицательная корреляция с коэффициентом корреляции $Q = -0.62$. Снижение активности землетрясений на глубинах более 20 км отмечено также и для некоторых других регионов, в частности для землетрясений на восточном фланге области коллизии Евразии и Аравии, в районе Загроса и Иранского нагорья [5], а также в пределах БРС [1].

В итоге, для сейсмоактивных зон, расположенных в пределах и в окрестности России, начиная с конца XX в. прослеживается рост сейсмической активности близповерхностных горизонтов, по времени совпадающий с увеличением масштабов и разнообразия техногенных воздействий, таких как добыча углеводородов, которая затрагивает относительно более глубокие горизонты геофизической среды, обеспечивает дефлюидизацию коры и потерю ею демпфирующих свойств, а также бомбардировки в ходе региональных конфликтов.

Данные, полученные для ряда регионов, показывают, что сейсмическая активизация верхних уровней литосферы сопровождается снижением активности более глубоких горизонтов, что позволяет предположить перестройку механизмов накопления и разрядки тектонических напряжений с проявлением доминирующей роли близповерхностных горизонтов. Рост активности землетрясений с гипоцентрами на малых глубинах может привести к увеличению числа жертв и разрушений в ходе сильных землетрясений, поскольку события с близповерхностными очагами при одинаковой энергии обладают наиболее катастрофическими последствиями.

Список литературы

1. Анисимова О.В., Архипова Е.В. Активизация сейсмичности Байкальской рифтовой системы в условиях нарастания темпов хозяйственного освоения Восточной Сибири // Сб. материалов XVIII Международной конференции "Геологическая среда, минерагенические и сеймотектонические процессы" – Воронеж: Изд-полиграф. центр "Научная книга", 2012. С. 17–20.
2. Архипова Е.В. Влияние внешних факторов на сейсмичность Турции // Вестник Международного университета природы, общества и человека Дубна». 2012. Т. 27. № 2. С. 3–12.
3. Архипова Е. В., Жигалин А. Д., Морозова Л. И., Николаев А. В. Ванское землетрясение 23.10.2011 г.: естественные и техногенные причины // Доклады Академии наук. 2012. Т. 446. № 4. С. 438–441.
4. Богатства шельфа Сахалина // Режим доступа: свободный. Дата обращения: 09.04.2019. http://www.cdu.ru/tek_russia/articles/1/450/.
5. Короновский Н.В., Брянцева Г.В., Архипова Е.В., Анисимова О.В. Структурно-геоморфологический анализ и сейсмичность Иранского региона // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 2017. Т. 92. № 3. С. 12–22.
6. Трофимов В.Т. Экологическая геодинамика: учебник // В.Т. Трофимов, М.А. Харькина, И.Ю. Григорьева; под ред. В.Т. Трофимова. М.: КДУ, 2008. 473 с.
7. Трофимов В.Т., Николаев А.В., Жигалин А.Д., Барабошкина Т.А., Харькина М.А., Архипова Е.В. Расширение добычи нефти и газа и возрастание экологического риска // Вестн. моск. ун-та. Серия 4: Геология. М.: Изд-во Моск. ун-та, № 3. С. 7–16.
8. Earthquake Data Base United States Geological Survey URL:<http://earthquake.usgs.gov>. Режим доступа: свободный. Дата обращения: 09.01.2019
9. Nikolaev A.V., Arkhipova E.V., Zhigalin A.D. Morozova L.I. The effect of Mass Bombing Attacks on Seismicity // European Seismological Commission 33rd General Assembly 19–24 August 2012, Moscow, Russia // Oral presentation, Program of Assembly. P. 59.
10. Tamaki K., Honza E. Incipient subduction and obduction along the Eastern margin of the Japan Sea // Tectonophysics. 1985. V. 119. P. 381–406.