

ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ АЛЕУТСКОЙ СУБДУКЦИОННОЙ ЗОНЫ И ИХ ВОЗМОЖНАЯ СВЯЗЬ С КЛИМАТИЧЕСКИМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ В АРКТИКЕ

И. С. Владимирова

Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (Обнинск, Калужская область, Российская Федерация), Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (Долгопрудный, Московская область, Российская Федерация)

Л. И. Лобковский, Д. А. Алексеев

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (Долгопрудный, Московская область, Российская Федерация), Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН (Москва, Российская Федерация)

Ю. В. Габсатаров

Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (Обнинск, Калужская область, Российская Федерация), Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (Долгопрудный, Московская область, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2021 г.

Проведен ретроспективный анализ особенностей сейсмического процесса в Алеутской зоне субдукции. Выявлено укорочение сейсмических циклов межплитовых землетрясений в ее западной части. Предложен механизм, объясняющий сокращение продолжительности сейсмических циклов, — клавишно-блоковая модель генерации сильнейших землетрясений в условиях косоугольной субдукции. Сокращение временных интервалов между сериями сильнейших сейсмических событий в Алеутской зоне субдукции может служить дополнительным геодинамическим фактором, влияющим на дальнейшие климатические изменения в Арктике.

Ключевые слова: Алеутская зона субдукции, сильнейшие землетрясения, геодинамическая модель, тектоника, Арктика, климатические изменения.

Введение

Освоение арктического региона — одно из приоритетных направлений социально-экономического развития Российской Федерации. Это связано с высокой ресурсоемкостью региона, а также с его важным стратегическим положением с точки зрения развития новых транспортных коридоров и обеспе-

чения национальной безопасности России. В свою очередь решение задач добычи и транспортировки полезных ископаемых, обеспечения надежного и безопасного транспортного сообщения в условиях экстремальных природно-климатических условий арктического региона требует изучения современных движений земной поверхности, в том числе обусловленных динамикой многолетнемерзлых грунтов, доминирующих в этом регионе. К числу основных опасностей, формирующих риски для развития Арк-

тической зоны, относится интенсивное потепление климата, происходящее в Арктике в 2—2,5 раза быстрее, чем в целом на планете¹. Выраженное увеличение среднегодовой температуры в приземном слое тропосферы, зарегистрированное как в среднем по России, так и в ее арктическом регионе [1], может приводить к вытаиванию подземного льда, что, в свою очередь, вызывает выраженные изменения рельефа в результате действия процессов термокарста и термоденудации. Эти процессы оказывают огромное влияние на безопасность эксплуатации инженерных сооружений в Арктике, в частности при увеличении среднегодовой температуры воздуха на 2°C несущая способность свайных фундаментов сократится на 50% [2]. Отсутствие надежных прогнозов будущего состояния климата Арктики объясняется недостаточностью современных знаний о причинах изменений глобального климата и особыми условиями формирования климата в высоких широтах [3].

Современные комплексные исследования арктического региона выявили факт существенного влияния геодинамических процессов на состояние криолитозоны. Исследования, проводимые под руководством Л. И. Лобковского, позволили создать геодинамическую модель, связывающую тектоническую эволюцию Арктики с крупнейшими деформационными системами Тихоокеанского высокоактивного пояса [4—6]. В частности, в [6] в качестве одного из возможных факторов, влияющих на климатические изменения в Арктике, был предложен сейсмогенно-триггерный механизм возникновения фаз резкой активизации эмиссии метана вследствие сильных механических возмущений криолитосферы, вызванных сильнейшими землетрясениями в Алеутской зоне субдукции.

Сейсмические события, которые могли привести к активизации эмиссии метана в арктическом регионе, произошли в пределах Алеутской зоны субдукции за относительно небольшой промежуток времени — с 1957 по 1965 гг. [6]. Создание адекватной геодинамической модели, способной дать объяснение возникновению целой серии сильнейших межплитовых субдукционных землетрясений за столь короткий временной интервал, позволит получить новые данные, полезные при прогнозировании будущего климатического состояния арктического региона. С этой целью в настоящей работе рассмотрены особенности развития сейсмического процесса в Алеутской зоне субдукции и предложена модель генерации сильнейших межплитовых землетрясений в зонах косоориентированной субдукции с учетом разломно-блоковой делимости литосферы.

Особенности сейсмического процесса в Алеутской субдукционной зоне

Алеутскую островную дугу зачастую выделяют как один из наиболее сейсмически и тектонически активных регионов на периферии Тихого океана. Вследствие выраженного изгиба структур Алеутской островной дуги направление конвергенции Тихоокеанской и Североамериканской литосферных плит меняется от почти нормального к оси желоба в восточной части субдукционной зоны до субпараллельного на западе, вблизи сочленения Алеутской и Курило-Камчатской островных дуг. По мере нарастания касательной составляющей субдукции в западном направлении происходит постепенная смена условий сжатия на условия почти чистого правостороннего сдвига, что сопровождается изменениями в проявлениях сейсмической и вулканической активности вдоль простирания дуги. Не остается неизменной и скорость субдукции: на юге полуострова Аляска она составляет ~62 мм/год, в центральной части Алеутских островов возрастает до ~72 мм/год и достигает ~76 мм/год на их западной оконечности [7].

В пределах Алеутской субдукционной зоны произошли землетрясения, входящие в число сильнейших за весь период инструментальных наблюдений сейсмических явлений. Очаги этих землетрясений заполнили почти всю территорию Алеутской островной дуги и Аляски в период с 1938 по 1965 гг. [8] (рис. 1). Исключение составил Командорский сегмент, расположенный на западной оконечности островной дуги. Последнее сильное межплитовое субдукционное землетрясение ($M_w = 8,1$) в этом сегменте произошло в 1917 г. и затронуло лишь его западную окраину [9]. Точное определение периодов повторяемости сильнейших межплитовых землетрясений Алеутской островной дуги затруднено в силу недостатка систематических палеосейсмических наблюдений и малонаселенности региона. Полученные приблизительные оценки продолжительности сейсмического цикла составляют 43—135 лет для разных сегментов островной дуги или 76—80 лет в среднем для всего Алеутско-Аляскинского региона [10; 11].

Исследование характеристик сейсмического процесса имеет большое значение для решения актуальных задач геодинамики и геофизики, в частности прогнозирования времени возникновения сильнейших землетрясений. Осредненные периоды повторяемости сильнейших землетрясений составляют порядка 100—1000 лет на подвижных границах плит и 1000—10 000 лет в их стабильных внутренних регионах [14]. Можно сказать, что сейсмический процесс в каждой конкретной сейсмогенной зоне достаточно стационарен во времени. Однако на практике вследствие действия различных факторов возможны заметные отклонения сейсмического режима от стационарности в ту или иную сторону. Например, миграция флюидов в земной коре может приводить к локальному снижению эффективной прочности литосферы, способствуя укорочению временного пе-

¹ Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года. — Утв. указом Президента РФ от 26 октября 2020 г. № 645. — URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202010260033>.

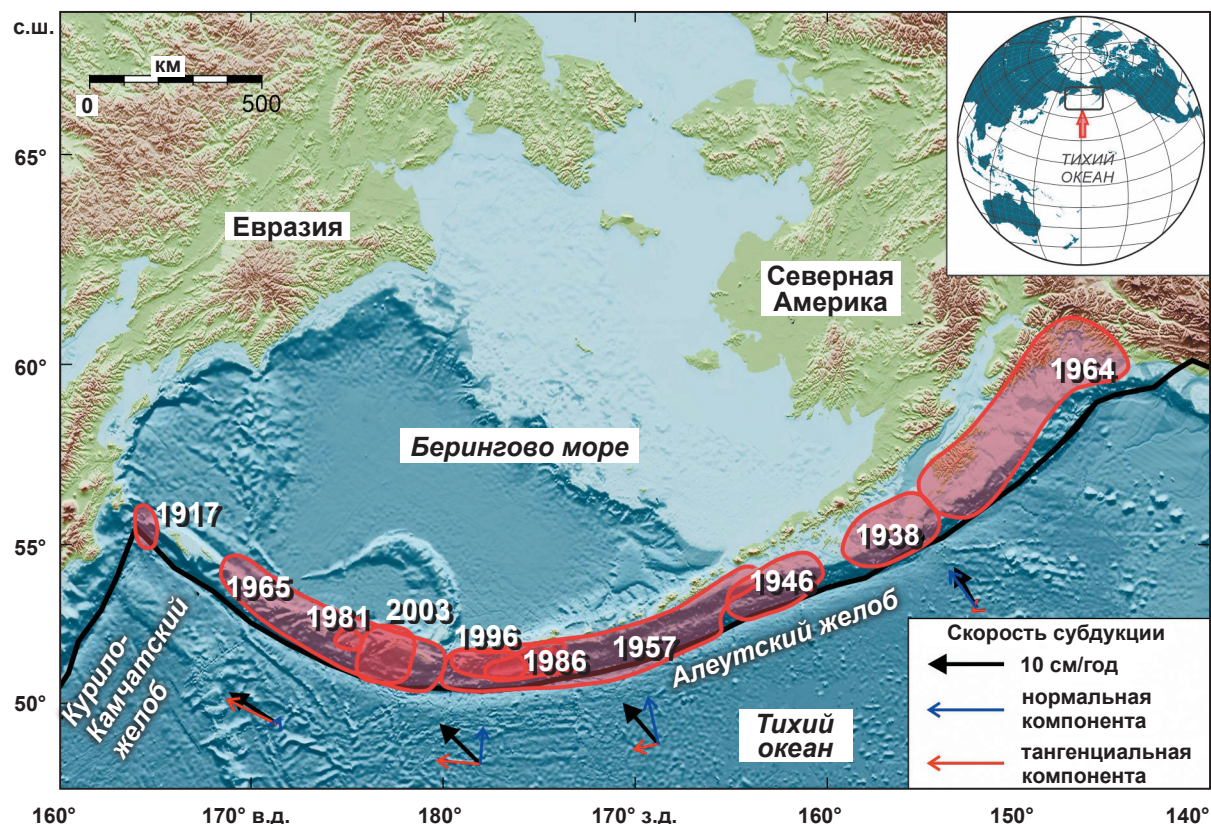


Рис. 1. Расположение очаговых зон сильнейших межплитовых субдукционных землетрясений на Аляске и Алеутской островной дуге [9; 12; 13]

Fig. 1. Location of focal zones of major interpolate subduction earthquakes in Alaska and the Aleutian island arc [9; 12; 13]

риода до следующего катастрофического события. Кроме того, само по себе возникновение сильного землетрясения оказывает непосредственное влияние на напряженно-деформированное состояние соседних участков сейсмогенной зоны, тем самым приближая или отдаляя момент зарождения следующего столь же сильного события.

Примером такой неравномерности сейсмического процесса во времени является сейсмогенная активизация Алеутской зоны субдукции в середине XX в. [8]. Особый интерес представляет западная половина Алеутской островной дуги, поскольку межплитовые землетрясения магнитудой ~8 повторяются здесь чаще, чем в ее восточной части [10; 11]. Наиболее явное различие между этими сегментами — смена направления субдукции с почти ортогонального к оси желоба в восточной части субдукционной зоны на тангенциальное на западе (см. рис. 1).

В режиме косой субдукции происходит не только фронтальное, но и латеральное взаимодействие литосферных плит. Наличие тангенциальной компоненты скорости конвергенции плит приводит к возникновению касательных напряжений, параллельных границе взаимодействующих плит. При этом большая часть латеральной подвижки передается на край нависающей плиты, что приводит к образованию сдвиговых разломов, ориентированных как

субпараллельно, так и субперпендикулярно оси субдукции [15—17].

Наличие активных разломных структур в крае нависающей плиты в комплексе с косоориентированным пододвиганием субдуцирующей плиты может оказывать заметное влияние на процессы подготовки и реализации сильнейших землетрясений в зонах субдукции. К отличительным особенностям, характерным для землетрясений, возникающих в зонах косой субдукции, можно отнести, например, образование крайне протяженных очагов землетрясений, длина которых по разным оценкам достигает 800—1200 км. Наиболее яркими примерами событий с подобными очагами являются Алеутское землетрясение 1957 г. с $M = 8,6$ и Суматра-Андаманское событие 2004 г. с $M = 9,1$.

Ретроспективный анализ пространственно-временного распределения очаговых зон сильнейших межплитовых землетрясений (от востока к западу) позволил выявить основные особенности протекания сейсмического процесса в западной части Алеутской зоны субдукции.

Землетрясение у Крысых островов магнитудой 8,7 произошло 2 апреля 1965 г. Длина очага этого события превысила 600 км. Перераспределение напряжений в окрестности очага привело к возникновению события 30 марта 1975 г. с $M_s = 7,5$ на краевом океаническом валу. Восточная часть очаговой

зоны события 1965 г. снова вспарывалась в 1981 и 2003 гг. событиями с $M = 7,0$ и $7,7$ соответственно. Предположительно в предыдущий раз вся очаговая область землетрясения 1965 г. вспарывалась в период с 1880 по 1907 гг. во время серии событий магнитудой $7-8$ [8; 18].

Сразу к востоку от разломной зоны события у Крысых островов 1965 г. расположен очаг Великого Алеутского землетрясения 3 сентября 1957 г. с $M = 8,6$. Общая протяженность очага по разным оценкам составила от 800 (результат инверсии цunami-данных) до 1200 км (по размерам облака афтершоков) [11—13].

7 мая 1986 г. в том же сегменте островной дуги произошло землетрясение с $M_w = -8$. Событие 1986 г. примечательно в первую очередь тем, что оно произошло спустя всего 29 лет после предыдущего сильного землетрясения (1957 г., $M_w = 8,6$) в центральном сегменте Алеутской островной дуги. Исходя из скорости накопления упругих напряжений в Андреяновском сегменте Алеутской островной дуги, предполагали, что упругий сейсмогенный потенциал, необходимый для реализации события подобной силы в рассматриваемом регионе, может накопиться за период порядка 60—90 лет [11]. Событие 1986 г. произошло на западном фланге очага землетрясения 1957 г., перекрыв лишь 20% его очаговой области. При этом координаты эпицентров главных толчков упомянутых землетрясений лежат в пределах 1° как по широте, так и по долготе. Вплоть до землетрясения 1986 г. считалось, что сейсмический потенциал очаговой зоны 1957 г. будет крайне низким в течение следующих нескольких десятилетий. В 1996 г. в районе острова Адак произошло еще одно сильное землетрясение с $M = 7,9$. Его очаговая зона также расположена на западной оконечности очаговой зоны 1957 г., частично перекрывая очаговую область землетрясения 1986 г. Предположительно в 1902—1903 гг. в том же сегменте островной дуги реализовалась серия событий, магнитуды которых лежат в пределах от $7,4$ до $7,9$ [18].

Еще одно значимое событие произошло 1 апреля 1946 г. на восточной оконечности очаговой зоны землетрясения 1957 г. в зоне перехода от косой субдукции к нормальной. Магнитуда землетрясения составила $8,6$ [19], а длина разломной зоны по протяжению не превысила 200 км.

Как отмечено в [20], фронтальная часть Алеутской островной дуги имеет блоковую структуру. Блоки разделены между собой разломами и каньонами, секущими окраину литосферной плиты в направлении, перпендикулярном глубоководному желобу, а их характерные длины варьируют от нескольких десятков до первых сотен километров. Разломные зоны и подводные каньоны, ограничивающие блоки, служат также границами очагов сильных землетрясений. При этом очаги таких событий могут включать в себя сразу несколько блоков. Например, длины очагов землетрясений 1957 г. с $M = 8,6$ и 1965 г.

с $M = 8,7$ составили 800—1200 и 650 км соответственно, что указывает на согласованное смещение сразу нескольких крупных блоков [17].

Таким образом, основными особенностями динамики западного сегмента Алеутской островной дуги являются блоковое строение островодужной окраины, наличие выраженной тангенциальной составляющей перемещения блоков и существенное укорочение сейсмических циклов межплитовых землетрясений.

Модели динамики зон субдукции

Исследование пространственных и временных особенностей распределения очагов межплитовых землетрясений в субдукционных регионах привело к созданию ряда геомеханических моделей, описывающих порядок генерации сильнейших сейсмических событий. Одной из наиболее широко используемых является так называемая модель асперити [21], которая объясняет разницу в характеристических размерах очагов и периодах повторяемости катастрофических землетрясений, приуроченных к разным зонам субдукции. В предложенной модели, однако, не рассматриваются длительные переходные постсейсмические процессы, сопровождающие сильные землетрясения. Это может оказать серьезное влияние на специфику развития сейсмического процесса, поскольку длительность постсейсмической стадии может достигать 25% общей продолжительности сейсмического цикла [22]. Отметим, что в модели асперити не учитывается также возможность наличия тангенциальной составляющей в скорости конвергенции плит. Кроме того, в рассматриваемом регионе, согласно исследованиям распределения афтершоков сильнейших землетрясений, фундаментальный принцип модели асперити, в рамках которого сейсморазрыв всегда зарождается в наиболее сильно сцепленных сегментах разлома, в то время как слабо сцепленные сегменты вспарываются асейсмически, может быть неверным, по крайней мере в случае центральной части Алеутской дуги [23].

Влияние тангенциальной компоненты вектора конвергенции на динамику отдельных сегментов субдукционных зон учитывается в концепции тектонической «щепки». Согласно этой концепции, латеральное давление со стороны неортогонально пододвигающейся плиты приводит к образованию в крае нависающей плиты складок и разломов, ориентированных как субпараллельно, так и субперпендикулярно оси субдукции [15; 24]. В результате образуется так называемая тектоническая щепка, с внешней стороны ограниченная глубоководным желобом, а с внутренней — активным сдвиговым разломом, субпараллельным островной дуге и расположенным на расстоянии 100—300 км от желоба.

В Командорском сегменте Алеутской зоны субдукции зоны мелкофокусной сейсмичности одинаковой интенсивности обнаруживаются по обе стороны от островной дуги [25]. Это позволяет предположить

наличие в данном сегменте субдукционной зоны тектонической щепки. Причем подвижки в очагах землетрясений представляют собой взбросо-сдвиги на границе Тихоокеанская плита — щепка и сдвигосбросы на границе щепка — Североамериканская плита [25; 26].

Согласно [17], в Командорском сегменте были выявлены поперечные разрывные нарушения, выраженные в рельефе дна каньонами. Эти разрывные нарушения разбивают Командорскую сейсмическую брешь на восемь блоков размерами 50—100 км. Таким образом, Командорский участок Алеутской субдукционной зоны структурно может представлять собой как один узкий литосферный блок — щепку, так и ансамбль небольших блоков. Отметим также, что модель тектонической щепки не применима для объяснения возникновения крайне протяженных очагов землетрясений восточнее 168° з. д.

В данной работе для объяснения укорочения продолжительности сейсмического цикла в западной части Алеутской островной дуги предлагается применить клавишную модель генерации сильнейших межплитовых землетрясений в зонах субдукции [27]. Согласно этой модели, фронтальная часть островной дуги разделена на блоки клиновидной формы (клавиши), отделенные друг от друга разломами, поперечными к островной дуге и простирающимися в глубину до кровли пододвигающейся плиты. С внешней стороны эти блоки ограничены глубоководным желобом, а с внутренней — системой продольных разломов, отделяющих их от тыловой части островной дуги. Фронтальные островодужные блоки сцеплены с пододвигающейся плитой через вязкий контактный слой, состоящий из смеси осадочных пород с базальтовыми брекчиями. В процессе взаимодействия литосферных плит блоки накапливают напряжения, высвобождение которых происходит во время сильнейших сейсмических событий.

Образование разрывов сплошности в крае нависающей плиты объясняется неравномерностью пододвигания субдуцирующей плиты, что связано с неоднородным распределением коэффициента механической сцепленности вдоль поверхности взаимодействующих плит [16; 28]. Положительные формы рельефа субдуцирующей плиты, такие как подводные горы, уступы разломов, выходы коренных пород и т. д., представляют собой участки с более высоким коэффициентом трения, нежели соседние участки, покрытые океаническими осадками. Таким образом, предел прочности на разрыв и скол в областях с высоким коэффициентом трения будет достигаться позже, чем в областях с более низким коэффициентом, что, по-видимому, и является причиной сегментации. Отметим, что условия, достаточные для разделения среды на квазине независимые блоки, универсальны и могут обеспечиваться в режиме как нормальной, так и косоориентированной субдукции.

В пользу существования поперечных по отношению к островным дугам разломов свидетельствуют решения фокальных механизмов землетрясений,

а также геоморфологические данные, полученные в ходе комплексных океанографических экспедиций, проведенных в этом регионе в 2005—2006 гг. [29].

Образованный в итоге ансамбль блоков и разломов (рис. 2) может проявлять поведение как консолидированной, так и неконсолидированной среды в ответ на внешние воздействия разных интенсивности, длительности и частоты. Это связано с тем, что вязкий материал, заполняющий разломы, разделяющие блоки, имеет пониженную эффективную вязкость [27] по сравнению с материалом блоков. Это обуславливает возможность заметных относительных перемещений блоков при нагружении среды. Таким образом, на разных стадиях сейсмического цикла геосреда, состоящая из квазине независимых блоков, может деформироваться и как единая структура, и как набор отдельных структурных элементов благодаря возможности блоков перемещаться независимо. На протяжении самой длительной стадии сейсмического цикла — межсейсмической разделенная разломами активная окраина ведет себя как сплошная среда, реагирующая на внешнее давление со стороны пододвигающейся плиты. Во время самой короткой сейсмической стадии цикла та же активная окраина демонстрирует поведение неконсолидированной среды, поскольку очаг землетрясения, как правило, захватывает только один или несколько соседних блоков. Длина итогового очага, а следовательно, и количество сместившихся блоков определяются в основном величиной накопленных напряжений и силой трения на боковых поверхностях взаимодействующих сегментов. Во время постсейсмической стадии цикла происходит релаксация остаточных упругих напряжений за счет квазине независимых перемещений блоков. Такое поведение блочной геосреды явным образом прослеживается при анализе сеймотектонических деформаций, связанных с сильнейшими землетрясениями начала XXI в. [30—32].

В работе [27] приведено описание клавишной модели генерации межплитовых землетрясений для случая ортогональной субдукции (см. рис. 2а). Рассмотрим влияние тангенциальной составляющей скорости конвергенции на процесс накопления упругих напряжений. При косоой субдукции клавишные блоки прижимаются друг к другу из-за действия продольной компоненты силы сцепления на подошве блоков, возникающей в результате неортогонального движения пододвигающейся плиты (см. рис. 2б). Поскольку смещение блоков в продольном направлении в силу геометрии зоны субдукции затруднено, то в контактном слое возникают достаточно большие касательные напряжения, пропорциональные значению эффективной вязкости слоя, которые можно рассматривать как фоновые или «начальные» напряжения. Относительно этих «начальных» напряжений в контактном слое развиваются добавочные напряжения, отвечающие циклическим стадиям нагрузки и разгрузки клавишных блоков в ортогональном направлении относительно дуги.

При наличии значительного «начального» напряжения в контактном слое время догрузки сжимаемого клавишного блока до возникновения сильнейшего землетрясения при косо́й субдукции должно быть значительно меньше по сравнению с аналогичным временем подготовки сильнейшего землетрясения в условиях ортогональной субдукции. Поэтому период повторяемости сильнейших межплитовых землетрясений в одних и тех же сегментах дуги при косо́й субдукции становится значительно короче по сравнению с ортогональным случаем. Кроме того, наличие дополнительного латерального сжатия сейсмогенных блоков повышает вероятность последующей активизации соседних сегментов островной дуги, что может приводить к появлению серий сильнейших землетрясений. В западной части Алеутской зоны субдукции тангенциальная составляющая движения скорости сближения плит выражена достаточно сильно, а модуль скорости возрастает при продвижении с востока на запад. Таким образом, накопление напряжений, достаточных для возникновения землетрясения, в западном сегменте островной дуги будет происходить существенно быстрее, чем в случае ортогональной субдукции. Другая характерная особенность сейсмического процесса при косо́й субдукции связана с возникновением сверхдлинных очагов, например при Алеутском землетрясении 1957 г. или Суматранском землетрясении 2004 г. Такие аномально длинные очаги возникают вследствие упомянутого выше явления продольного сжатия клавишных блоков, что приводит из-за большой силы сцепления между ними к «эффекту домино», когда «выстреливший» в сторону океана при сильнейшем землетрясении клавишный блок срывает соседний с ним блок в ту же сторону.

Еще одной яркой особенностью сейсмических циклов в западной части Алеутской зоны субдукции является отсутствие повторяющихся событий аналогичных магнитуд и пространственной протяженности в одном и том же сегменте. В рамках клавишно-блокового подхода границы очаговых зон событий, повторяющихся на одном участке субдукционной зоны, не обязательно должны в точности повторяться. Так, очаг нового события может включать соседние блоки, не сместившиеся во время предыдущего события. В то же время некоторые блоки, сместившиеся во время предыдущего сейсмического цикла, могут остаться не затронутыми в силу того, что накопленных в них напряжений недостаточно для динамического срыва.

Заклучение

Проведенное исследование показало, что направление вектора конвергенции плит может оказывать существенное влияние на процессы подготовки и реализации сильнейших межплитовых землетрясений в зонах субдукции. В частности, в результате анализа особенностей сейсмогенного процесса в западной части Алеутской зоны субдукции было установлено, что сейсмические циклы здесь в сред-

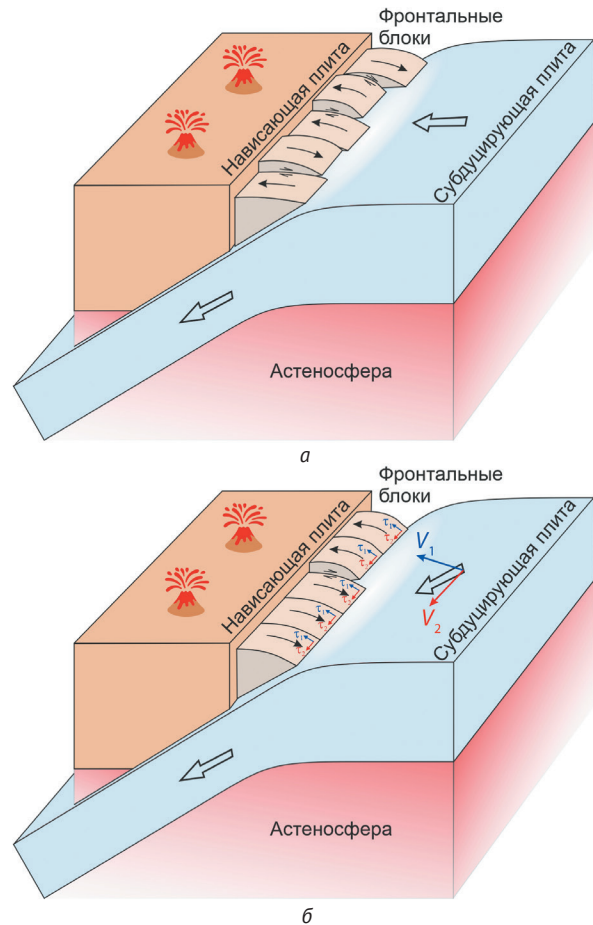


Рис. 2. Клавишная модель фронтальной части островной дуги в условиях нормальной (а) и косо́й (б) субдукции: V_1 — нормальная компонента скорости субдукции; V_2 — тангенциальная компонента скорости субдукции; τ_1 — касательные напряжения на подошве сейсмогенных блоков, вызванные ортогональным погружением субдуцирующей плиты; τ_2 — «начальные» касательные напряжения на подошве сейсмогенных блоков, вызванные их продольным сжатием
Fig. 2. Keyboard model of the frontal part of the island arc under conditions of normal (a) and oblique (b) subduction: V_1 — the normal subduction rate; V_2 — the tangential component of the subduction rate; τ_1 — shear stresses at the bottom of seismogenic blocks caused by the plate orthogonal subduction; τ_2 — “initial” shear stresses at the bottom of seismogenic blocks, caused by their longitudinal compression

нем короче, чем в восточной части. Помимо этого выявлено, что повторяющиеся на одних и тех же участках сильнейшие межплитовые землетрясения различаются как по магнитуде, так и по протяженности очага. В качестве механизма, объясняющего выявленные особенности сейсмического процесса в западной части Алеутской зоны субдукции, предложена клавишно-блоковая модель генерации сильнейших землетрясений в условиях косо́й субдукции.

Принимая во внимание предложенную концепцию генерации сильнейших землетрясений в зонах субдукции с выраженной тангенциальной составляющей и сейсмогенно-триггерную гипотезу активизации эмиссии метана в Арктической криолитосфере [6], можно заключить, что сокращение временных

интервалов между сериями сильнейших сейсмических событий в Алеутской зоне субдукции может служить дополнительным геодинамическим фактором, влияющим на дальнейшие климатические изменения в Арктике.

Оценка вклада предлагаемого механизма требует дальнейших натурных наблюдений с целью сбора и накопления фактических данных об изменениях климатического режима Северо-Арктической территории и установления связи этих изменений с особенностями развития сейсмического режима в Алеутской островной дуге.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 20-17-00140 «Разработка геомеханической модели циклов сильнейших землетрясений в зонах субдукции с использованием данных спутниковой геодезии».

Литература/References

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. — М.: Росгидромет, 2021. — 104 с.
Report on climate features in the Russian Federation for 2020. Moscow, Rosgidromet, 2021, 104 p. (In Russian).
2. Веселов И. А., Чуприян А. П. О мерах МЧС России по обеспечению реализации экономических и инфраструктурных проектов в Арктике и созданию системы специализированных аварийно-спасательных центров // Арктика: экология и экономика. — 2011. — № 1 (1). — С. 48—51.
Veselov I. A., Chupriyan A. P. On measures of the Russian Emergencies Ministry to ensure the implementation of economic and infrastructure projects in the Arctic and the creation of a system of specialized emergency rescue centers. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2011, no. 1 (1), pp. 48—51. (In Russian).
3. Шерстюков Б. Г. Климатические условия Арктики и новые подходы к изменению климата // Арктика и Север. — 2016. — № 24. — С. 39—67. — DOI: 10.17238/issn2221-2898.2016.24.39.
Sherstyukov B. G. The climatic conditions of the Arctic and new approaches to the forecast of the climate change. *Arctic and North*, 2016, no. 24, pp. 39—67. DOI: 10.17238/issn2221-2898.2016.24.39. (In Russian).
4. Лобковский Л. И. Тектоника деформируемых литосферных плит и модель региональной геодинамики применительно к Арктике и Северо-Восточной Азии // Геология и геофизика. — 2016. — Т. 57, № 3. — С. 476—495. — DOI: 10.15372/GiG20160302.
Lobkovsky L. I. Deformable plate tectonics and regional geodynamic model of the Arctic region and Northeastern Asia. *Russian Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, no. 3, pp. 371—386. DOI: 10.1016/j.rgg.2016.03.002.

5. Лобковский Л. И., Гарагаш И. А., Алексеев Д. А. Геодинамическая модель эволюции основных структур Американо-Азиатского бассейна // Докл. Акад. наук. — 2018. — Т. 480, № 4. — С. 469—473. — DOI: 10.7868/S0869565218160181.
Lobkovsky L. I., Garagash I. A., Alekseev D. A. Geodynamic evolution model of the major structures of Amerasian basin. *Doklady Earth Sciences*, 2018, vol. 480, pp. 753—757. DOI: 10.1134/S1028334X18060065.
6. Лобковский Л. И. Возможный сейсмогенно-триггерный механизм резкой активизации эмиссии метана и потепления климата в Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 3 (39). — С. 62—72. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-62-72.
Lobkovsky L. I. Possible seismogenic trigger mechanism of abrupt activation of methane emission and climate warming in the Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2020, no. 3 (39), pp. 62—72. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-62-72. (In Russian).
7. DeMets C., Gordon R. G., Argus D. F., Stein S. Effects of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophys. Res. Lett.*, 1994, vol. 21, pp. 2191—2194. DOI: 10.1029/94GL02118.
8. Boyd Th. M., Lerner-Lam A. L. Spatial distribution of turn-of-the-century seismicity along the Alaska-Aleutian arc. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1988, vol. 78, no. 2, pp. 636—650.
9. Викулин А. В. Вариант долгосрочного сейсмического прогноза для Камчатского залива и Кроноцкого полуострова // Вулканология и сейсмология. — 1986. — № 3. — С. 72—83.
Vikulin A. V. Variant of long-term seismic forecast for the Kamchatka Bay and the Kronotsky Peninsula. *J. Volcanolog. Seismol.*, 1986, no. 3, pp. 72—83. (In Russian).
10. Hwang L. J., Kanamori H. Of the May 7, 1986 Andreanof Islands earthquake source parameters. *Geophys. Res. Lett.*, 1986, vol. 13, no. 13, pp. 1426—1429. DOI: 10.1029/GL013i013p01426.
11. Nishenko S. P., Jacob K. H. Seismic potential of the Queen Charlotte-Alaska-Aleutian seismic zone. *J. Geophys. Res.*, 1990, vol. 95, pp. 2511—2532. DOI: 10.1029/JB095iB03p02511.
12. Sykes L. R., Kisslinger J. B., House H., Davies J. N., Jacob K. H. Rupture zones of great earthquakes in the Alaska-Aleutian arc, 1784 to 1980. *Science*, 1980, vol. 210, no. 4476, pp. 1343—1345. DOI: 10.1029/ME004P0073.
13. Johnson J. M., Tanioka Y., Ruff L. J., Satake K., Kanamori H., Sykes L. R. The 1957 great Aleutian earthquake. *Pure Appl. Geophys.*, 1994, vol. 142, pp. 3—28. DOI: 10.1007/BF00875966.
14. Kanamori H., Brodsky E. E. The physics of earthquakes. *Reports on Progress in Physics*, 2004, vol. 67, pp. 429—1496. DOI: 10.1088/0034-4885/67/8/R03.
15. McCaffrey R. Oblique plate convergence, slip vectors, and forearc deformation. *J. Geophys. Res.*, 1992, vol. 97, pp. 8905—8915. DOI: 10.1029/92JB00483.

16. Авдейко Г. П., Палуева А. А. Сейсмотектоническое районирование и геодинамика Камчатской зоны субдукции // Вулканология и сейсмология. — 2011. — № 1. — С. 3—18.
Avdeiko G. P., Palueva A. A. The Kamchatka subduction zone: Seismotectonic regionalization and geodynamics. J. Volcanolog. Seismol., 2011, vol. 5, no. 1, pp. 1—16. DOI: 10.1134/S0742046311010027.
17. Лобковский Л. И., Баранов Б. В., Дозорова К. А. и др. Командорская сейсмическая брешь: прогноз землетрясения и расчет цунами // Океанология. — 2014. — Т. 54, № 4. — С. 561—573. — DOI: 10.7868/S0030157414030071.
Lobkovsky L. I., Baranov B. V., Dozorova K. A., Mazova R. K., Kiselman B. A., Baranova N. A. The Komandor seismic gap: earthquake prediction and tsunami computation. Oceanology, 2014, vol. 54, no. 4, pp. 519—531. DOI: 10.7868/S0030157414030071.
18. Davies J. N., Sykes L., House L., Jacob K. Shumagin seismic gap, Alaska: History of great earthquakes, tectonic setting and evidence for high seismic potential. *J. Geophys. Res.*, 1981, vol. 86, pp. 3821—3855. DOI: 10.1029/JB086iB05p03821.
19. López A. M., Okal E. A. A seismological reassessment of the source of the 1946 Aleutian 'tsunami' earthquake. *Geophys. J. Int.*, 2006, vol. 165, no. 3, pp. 835—849. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2006.02899.x.
20. Spence W. The Aleutian Arc: Tectonic blocks, episodic subduction, strain diffusion, and magma generation. *J. Geophys. Res.*, 1977, vol. 82, no. 2, pp. 213—230. DOI: 10.1029/JB082i002P00213.
21. Lay T., Kanamori H. An asperity model of large earthquake sequences. *Earthquake prediction: An international review*. Washington, D.C., AGU, 1981, pp. 579—592. DOI: 10.1029/ME004P0579.
22. Федотов С. А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. — Гл. 8. — М.: Наука, 1968. — С. 121—150.
Fedotov S. A. About the seismic cycle, the possibility of quantitative seismic zoning and long-term seismic forecasting. Seismic zoning of the USSR. Moscow, Nauka, 1968, pp. 121—150. (In Russian).
23. Boyd Th. M., Engdahl E. R., Spence W. Seismic cycles along the Aleutian arc: Analysis of seismicity from 1957 through 1991. *J. Geophys. Res.*, 1995, vol. 100, no. B1, pp. 621—644. DOI: 10.1029/94JB02641.
24. Beck M. E. J. On the mechanism of tectonic transport in zones of oblique subduction. *Tectonophysics*, 1983, vol. 93, pp. 1—11. DOI: 10.1016/0040-1951(83)90230-5.
25. Баранов Б. В., Монин А. С. О Курило-Алеутской субдукции // Докл. АН СССР. — 1985. — Т. 281. — № 6. — С. 1328—1331.
Baranov B. V., Monin A. S. O Kurilo-Aleutskoi subdukcii. Dokl. AN SSSR, 1985, vol. 281, no. 6, pp. 1328—1331. (In Russian).
26. Левина В. И., Ландер А. В., Митюшкина С. В., Чеброва А. Ю. Сейсмичность Камчатского региона 1962—2011 гг. // Вулканология и сейсмология. — 2013. — № 1. — С. 41—64. — DOI: 10.7868/S0203030613010057.
Levina V. I., Lander A. V., Mityushkina S. V., Chebrova A. Yu. The Seismicity of the Kamchatka Region: 1962—2011. J. Volcanolog. Seismol., 2013, vol. 7, no. 1, pp. 37—57. DOI: 10.1134/S0742046313010053.
27. Lobkovsky L. I., Kerchman V. I., Baranov B. V., Pristavakina E. I. Analysis of seismotectonic processes in subduction zones from the standpoint of a keyboard model of great earthquakes. *Tectonophysics*, 1991, vol. 199, pp. 211—236. DOI: 10.1016/0040-1951(91)90173-P.
28. Cormier V. F. Tectonics near the junction of the Aleutian and Kuril-Kamchatka Arcs and a mechanism for Middle Tertiary magmatism in the Kamchatka Basin. *Geological Society of America Bull.*, 1975, vol. 86, pp. 443—453. DOI: 10.1130/0016-7606(1975)86<443:TNTJOT>2.0.CO;2.
29. Baranov B. V., Ivanchenko A. I., Dozorova K. A. The Great 2006 and 2007 Kuril Earthquakes, Forearc Segmentation and Seismic Activity of the Central Kuril Islands Region. *Pure Appl. Geophys.*, 2015, vol. 172, no. 12, pp. 3509—3535. DOI: 10.1007/s00024-015-1120-z.
30. Лобковский Л. И., Владимирова И. С., Габсатаров Ю. В. и др. Сейсмотектонические деформации, связанные с землетрясением Мауле 2010 г., на разных стадиях сейсмического цикла по данным спутниковых геодезических наблюдений // Докл. Акад. наук. — 2017. — Т. 477, № 6. — С. 716—721. — DOI: 10.7868/S0869565217360191.
Lobkovsky L. I., Baranov B. V., Vladimirova I. S., Gabsatarov Y. V., Garagash I. A., Steblov G. M. Seismotectonic deformations related to the 2010 Maule earthquake at different stages of the seismic cycle from satellite geodetic observations. Doklady Earth Sciences, 2017, vol. 477, no. 2, pp. 1498—1503. DOI: 10.1134/S1028334X17120261.
31. Лобковский Л. И., Владимирова И. С., Габсатаров Ю. В., Стеблов Г. М. Сейсмотектонические деформации, связанные с землетрясением Тохoku 2011 г., на разных стадиях сейсмического цикла по данным спутниковых геодезических наблюдений // Докл. Акад. наук. — 2018. — Т. 481, № 5. — С. 548—552. — DOI: 10.31857/S086956520002121-6.
Lobkovsky L. I., Vladimirova I. S., Gabsatarov Y. V., Steblov G. M. Seismotectonic deformations related to the 2011 Tohoku earthquake at different stages of the seismic cycle, based on satellite geodetic observations. Doklady Earth Sciences, 2018, vol. 481, no. 2, pp. 1060—1065. DOI: 10.1134/S1028334X18080159.
32. Vladimirova I. S., Lobkovsky L. I., Gabsatarov Y. V., Steblov G. M., Vasilenko N. F., Prytkov A. S., Frolov D. I. Patterns of the seismic cycle in the Kuril island arc from GPS observations. *Pure Appl. Geophys.*, 2020, vol. 177, no. 8, pp. 3599—3617. DOI: 10.1007/s00024-020-02495-z.

Информация об авторах

Владимирова Ирина Сергеевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (249035, Россия, Калужская область, Обнинск, просп. Ленина, д. 189), научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская область, Долгопрудный, Институтский пер., д. 9), e-mail: vladis@gsras.ru.

Лобковский Леопольд Исаевич, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, руководитель лаборатории, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская область, Долгопрудный, Институтский пер., д. 9), научный руководитель Геологического направления, руководитель лаборатории, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский просп., д. 36), e-mail: llobkovsky@ocean.ru.

Алексеев Дмитрий Александрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская область, Долгопрудный, Институтский пер., д. 9), старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский просп., д. 36), e-mail: alexeevgeo@gmail.com.

Габсатаров Юрий Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (249035, Россия, Калужская область, Обнинск, просп. Ленина, д. 189), научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская область, Долгопрудный, Институтский пер., д. 9), e-mail: vladis@gsras.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Владимирова И. С., Лобковский Л. И., Алексеев Д. А., Габсатаров Ю. В. Особенности сейсмического процесса в западной части Алеутской субдукционной зоны и их возможная связь с климатическими изменениями в Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2022. — Т. 12, № 1. — С. 58—67. — DOI: 10.25283/2223-4594-2022-1-58-67.

FEATURES OF THE SEISMIC PROCESS IN THE WESTERN PART OF THE ALEUTIAN SUBDUCTION ZONE AND THEIR POSSIBLE RELATIONSHIP WITH CLIMATE CHANGES IN THE ARCTIC

Vladimirova, I. S.

Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (Obninsk, Kaluga Region, Russian Federation), Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University) (Dolgoprudny, Moscow Region, Russian Federation)

Lobkovsky, L. I., Alekseev, D. A.

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University) (Dolgoprudny, Moscow Region, Russian Federation), P. P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

Gabsatarov, Yu. V.

Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (Obninsk, Kaluga Region, Russian Federation), Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University) (Dolgoprudny, Moscow Region, Russian Federation)

The article was received on November 23, 2021

Abstract

In the second half of the XX century, there was a pronounced increase in the average annual temperature in the troposphere surface layer of the Russian Arctic region, which led to a scaling-up in the risks of natural disasters associated with the cryolithosphere degradation. Modern integrated studies of the Arctic have revealed a significant influence of geodynamic processes on the permafrost state. Previously, a seismogenic-trigger mechanism of the occurrence of climate warming phases in the Arctic proved to be possible due to strong mechanical dis-

turbances of the marginal region of the Arctic lithosphere, caused by major earthquakes in the Aleutian subduction zone. The authors discuss the features of the seismic cycle in the Aleutian subduction zone, characterized by the presence of a pronounced tangential component of the convergence vector of lithospheric plates. The study shows that the orientation of the plate convergence vector relative to subduction zone axis can have a significant impact on the preparation and occurrence of major earthquakes in subduction zones. In particular, the analysis of the seismic activity occurring in the western part of the Aleutian island arc showed that the seismic cycles here are shorter than in the eastern part of the arc. The authors revealed that major earthquakes, repeated in the same areas of the western part of the Aleutian subduction zone, differ both in magnitude and foci length. Taking into account the oblique subduction setting, the authors propose a key model for the generation of major subduction-associated earthquakes as a mechanism potentially capable to explain the reduction in the seismic cycle duration and noticeable differences in the spatial extent and the foci localization of seismic events with similar magnitudes observed in the same segment of the western half of the Aleutian subduction zone.

Keywords: Aleutian subduction zone, major earthquakes, geodynamic model, tectonics, Arctic, climate change.

Russian Science Foundation funded the study, grant No. 20-17-00140 "Development of a geomechanical model of major earthquake cycles in subduction zones, using satellite geodesy data".

Information about the authors

Vladimirova, Irina Sergeevna, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (189, Lenina prosp., Obninsk, Kaluga Region, Russia, 249035), Researcher, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University) (9, Institutskii per., Dolgoprudny, Moscow Region, Russia, 141701), e-mail: vladis@gsras.ru.

Lobkovsky, Leopold Isaevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of RAS, Head of Laboratory, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University) (9, Institutskii per., Dolgoprudny, Moscow Region, Russia, 141701), Head of Geology and Geodynamics Department, Head of Laboratory, P. P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS (36, Nahimovskii prosp., Moscow, Russia, 117997), e-mail: llobkovsky@ocean.ru.

Alekseev, Dmitry Aleksandrovich, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University) (9, Institutskii per., Dolgoprudny, Moscow Region, Russia, 141701), Senior Researcher, P. P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS (36, Nahimovskii prosp., Moscow, Russia, 117997), e-mail: alexeevgeo@gmail.com.

Gabsatarov, Yuri Vladimirovich, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (189, Lenina prosp., Obninsk, Kaluga Region, Russia, 249035), Researcher, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University) (9, Institutskii per., Dolgoprudny, Moscow Region, Russia, 141701), e-mail: vladis@gsras.ru.

Bibliographic description of the article

Vladimirova, I. S., Lobkovsky, L. I., Alekseev, D. A., Gabsatarov, Yu. V. Features of the seismic process in the western part of the Aleutian subduction zone and their possible relationship with climate changes in the Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2022, vol. 12, no. 1, pp. 58—67. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-1-58-67. (In Russian).

© Vladimirova I. S., Lobkovsky L. I., Alekseev D. A., Gabsatarov Yu. V., 2022