

Прогресс в геофизике, начавшийся с Великого Аляскинского землетрясения 1964 года¹

© П. Хэсслер¹, У. Лейт², Д. Волд³, Дж. Филсон², К. Вольф²,
Д. Эпплегэйт², 2014

¹Геологическая служба США (USGS), Анкоридж, Аляска

²USGS, Рестон, Вирджиния

³USGS, Голден, Колорадо

Поступила 2 июля 2014 г.

Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

Немногим более 50 лет тому назад, 27 марта 1964 г., Аляска подверглась удару землетрясения, названного Великим, и порожденного им цунами. Это землетрясение с моментной магнитудой 9,2 является наиболее сильным в истории США и вторым по силе в мире за время инструментального наблюдения. Однако в настоящее время наиболее важно влияние, которое это землетрясение оказало на плитовую тектонику, процессы генерации цунами и палеосейсмологии, а также на развитие национальных программ по снижению рисков, связанных с землетрясениями и цунами.

Землетрясение и его последствия. Землетрясение 1964 г. на Аляске произошло вследствие разрушения вдоль взброса на границе между поддвигающейся Тихоокеанской и надвигающейся Северо-Американской. Оно сопровождалось сотрясениями значительной территории и тектонической деформацией. Во время землетрясения территория размером примерно 800 на 250 км (рис. 1) переместилась на юго-восток, причем наибольшее смещение достигало 20 м, а вызванные землетрясением подводные оползни породили разрушительные локальные цунами, которые достигли берега всего через 90 с после начала толчков. Косейсмические смещения океанского дна генерировали цунами, которые привели к жертвам на Аляске, в Орегоне и Калифорнии. Цунами ответственно за 122 смертельных случая из 131, причем 85 смер-

тей связаны с цунами, вызванными подводными оползнями. Землетрясение ощущалось на всей Аляске. Большая часть заселенных территорий Аляски, главные транспортные артерии, порты и инфраструктура расположены в пределах или вблизи зоны разрушения Аляскинского землетрясения (рис. 2, слева). Ущерб, причиненный землетрясением и порожденными им цунами, составил 300 млн долл. в ценах 1964 г. (2,5 млрд долл. 2014 г.). Сотрясения на Аляске продолжались 4,5 мин и привели к огромным разрушениям, в особенности от вызванных ими оползней (рис. 2, справа). В дальней зоне землетрясения сейсмические волны раскачали Космическую иглу Сиэттла (телевышку — прим. перев.), привели к появлению всплесков в резервуарах воды во Флориде и повлияли на уровень грунтовых вод в восточных Соединенных Штатах.

Плитовая тектоника в действии. Землетрясение 1964 г. произошло в решающий момент в истории наук о Земле. А. Вегенер [Wegener, 1912] первым ввел представление о континентальном дрейфе, а более поздние палеомагнитные исследования [Irving, 1956] и [Runcorn, 1956], по-видимому, подтвердили существование таких движений. Наконец, "геопоэтическая" статья [Hess, 1962] об истории океанических бассейнов предложила правдоподобный механизм движения плит, основывающийся на представлении о спрединге океанского дна. Од-

¹Haeussler P., Leith W., Wald D., Filson J., Wolfe C., Applegate D., 2014. Geophysical advances triggered by 1964 Great Alaska earthquake. *Eos* 95(17), 141—142 (настоящая статья не подпадает под действие закона США об охране авторских прав. Перевод Я.М. Хазана).

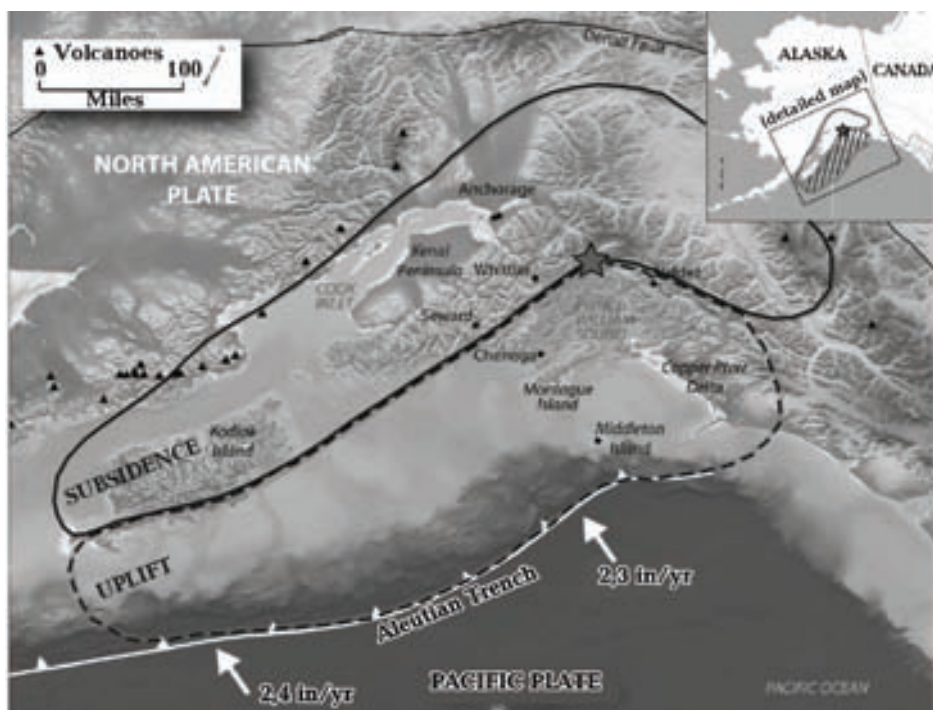


Рис. 1. Область разрушения землетрясения 1964 г. $M 9,2$. Показаны области поднятия, проседания, эпицентр (звезда), относительное движение плит (белые стрелки) и вулканы (черные треугольники).

нако представления о процессах, происходящих на конвергентных границах, оставались противоречивыми. Беньоф [Benioff, 1955] исследовал распределение глубокофокусных землетрясений на всей циркум-тихоокеанской гра-

нице. Он заметил, что землетрясения происходили вдоль плоскостей, погружающихся под континенты или вулканические дуги, и предположил, что с океанической стороны располагался взбросовый разлом, уходящий под континент



Рис. 2. Слева — губернатор Аляски Вильям Эган, осматривающий разрушения, причиненные землетрясением 1964 г. в Вальдесе (с разрешения Денниса Эгана). Справа — первая страница газеты Anchorage Daily Times на следующий после землетрясения день (с разрешения Геологической службы США).

или вулканическую дугу, на что ранее указывали [Honda, Masatsuka, 1952], основываясь на наблюдениях первых смещений. Однако после работы Беньюфа некоторые сейсмологи ошибочно предположили, что во время сильных циркум-тихоокеанских землетрясений происходит сдвиговое смещение (strikeslip) (см., например, [Hodgson, 1957]). Анализ механизма очага землетрясения 1964 г. указал на два возможных варианта расположения плоскости, по которой происходило смещение, — почти вертикальная или горизонтальная. Менее чем через две недели после землетрясения 1964 г. стало понятно, что ближе к континенту наблюдается полоса проседания, а со стороны океана — полоса поднятия.

В статье 1965 г., которая стала поворотным пунктом в изучении процессов генерации сильных землетрясений и цунами, геолог Геологической службы США Джордж Плэфкер [Plafker, 1965], убедительно показал, что наблюдаемая картина деформации согласуется только с разломом, представляющим собой "мега-взброс" по пологопадающей плоскости разлома. Анализ афтершоковой последовательности подтвердил эту интерпретацию [Stauder, Bollinger, 1966]. Работа Плэфкера позволила получить полевые геологические доказательства, которые помогли объяснить, куда девается океаническая кора, создаваемая в срединно-океанических хребтах. После работы, посвященной Аляске, Плэфкер исследовал самое мощное наблюдавшееся землетрясение — чилийское с M 9,5 1960 г. Он обнаружил такую же, как в Аляске, картину вертикальных смещений — пояс поднятия и пояс проседания, причем поднятие наблюдалось дальше от континента, а проседание — ближе к нему [Plafker, Savage, 1970]. Эти две статьи о двух сильнейших землетрясениях убедили скептиков в том, что на конвергентных границах плит происходят мегавзбросовые землетрясения. Более того, гигантская сила обоих землетрясений была более полно оценена после работы Канамори [Kanamori, 1977], который разработал основывающуюся на сейсмическом моменте шкалу магнитуд для измерения энергии сильнейших землетрясений.

Генерация цунами. Землетрясение 1964 г. также улучшило понимание того, как генерируются цунами. Ученые давно поняли, что цунами генерируют перемещения океанского дна, однако детальный механизм вне контекста плитовой тектоники оставался неясным. Землетрясение 1964 г. впервые дало возможность наблюдать отчетливую картину вертикальных ко-сейсмических перемещений, которая включа-

ла два параллельных пояса, причем поднятие происходило преимущественно на акватории, а проседание — в прибрежной зоне континента. Эти пояса в настоящее время используются в качестве начальных условий при моделировании цунами в зонах субдукции. Природа цунами, которые генерируются землетрясениями, стала более понятной после открытия первой системы наклонных разломов, ответвляющихся от мегавзброса и выходящих на поверхность (splay faults). Разломы этого типа, возникшие при землетрясении 1964 г., также были картированы Плэфкером [Plafker, 1967, 1969]. Плэфкер обнаружил, что с этими разломами связано локальное поднятие островных береговых линий с амплитудой до 9 м. Используя скорость волн цунами, Плэфкер показал, что времена прихода цунами в несколько точек на близлежащей береговой линии согласуются с генерацией цунами вдоль этих наклонных разломов.

"Отпечатки пальцев" мегавзбросовых палеоземлетрясений. Палеосейсмология является важным инструментом проникновения в историю землетрясений, которые происходили тысячи лет тому назад, и позволяет стимулировать и направлять усилия, направленные на снижение сейсмической опасности. В зонах субдукции в настоящее время используется большее количество палеосейсмологических методов, которые, по крайней мере частично, основываются на опыте Аляски. Например, тектоническое поднятие во время землетрясения 1964 г. добавило новую ступеньку к серии морских террас на острове Миддлтон, Аляска. Полная серия, включающая шесть ступенек, позволила проследить историю сильнейших землетрясений за последние 4—5 тыс. лет [Plafker, Rubin, 1978]. Тектоническое проседание во время землетрясения 1964 г. дало ключи к еще одному открытию четверть века спустя. Вдоль зоны субдукции Каскадия сильные землетрясения не были известны в течение двухсот лет письменной истории, но геофизики, тем не менее, обнаружили потенциальную возможность сильных землетрясений. Основываясь на примерах Аляски, геологи в 1980-х годах обнаружили стратиграфические указания на сильные землетрясения. Они реконструировали тысячи лет истории землетрясений в Каскадии, изучая погребенные остатки погрузившихся лесов и болот на просевших территориях в эстуариях тихоокеанского побережья [Atwater et al., 2005] и морские отложения турбидитов.

Геофизический мониторинг с целью быстрого оповещения о цунами. Система ран-

него оповещения о цунами является прямым следствием землетрясения 1964 г. В США система оповещения была создана после того, как Гавайи были опустошены цунами, вызванным Алеутским землетрясением 1946 г. Однако после землетрясения 1964 г. потребовалось около полутора часов для объявления тревоги, что было слишком долго для возможности эффективного реагирования. Как следствие, правительство США учредило Палмеровскую обсерваторию (в настоящее время — Национальный центр предупреждения о цунами в Палмере, Аляска) при Национальной администрации по проблемам океана и атмосферы (NOAA). Сегодня большинство предупреждений о цунами посылаются в течение примерно пяти минут после землетрясения. Опустошения, причиненные цунами 1964 г., заставили общины прибрежных населенных пунктов на Аляске обратить особое внимание на картирование наводнений, вызванных цунами. Уже первые усилия по этому картированию проложили путь к проведению кампаний по оповещению и обучению населения. В настоящее время эти кампании проводятся в рамках партнерства на штатно-федеральном уровне. Примером может быть национальная программа уменьшения опасности цунами, организуемая NOAA, в рамках которой люди, живущие на побережье, обучаются тому, что делать и куда идти, если поступает предупреждение о цунами. В настоящее время 11 общин на Аляске получили статус "готовы к цунами". Землетрясение 1964 г. мотивировало также усиление регионального сейсмического мониторинга на Аляске, центром которого является университет штата Аляска в Фербенксе.

Политика сейсмобезопасности. Землетрясение 1964 г. на Аляске оказало длительное влияние в трех направлениях на национальную политику сейсмобезопасности. Во-первых, оно показало, каким разрушительным является сильное землетрясение для современного общества и его инфраструктуры. Во-вторых, показало комплексный характер эффектов (например, нарушения почвы, цунами и сотрясения), которые должны изучаться в рамках национальной политики борьбы, направленной на снижение ущерба при землетрясении. В-третьих, впечатляющие картины домов, разрушенных оползнем на Турнагейнских холмах в Анкоридже как следствие трагедии 1964 г., продемонстрировали важность рассмотрения эффектов землетрясения с инженерной точки зрения, а также с точки зрения городского планирования и развития. Еще одно сильное землетрясение 1964 г.

произошло в Ниигато, вызвав ожигание почвы, которое привело к наклону некоторых жилых домов на различные углы. Изучение совместного опыта землетрясений 1964 г. на Аляске и в Японии подсказало необходимость выполнения в обеих странах исследований, финансируемых правительством и направленных на улучшение понимания физики ожигания почвы и улучшения ее структурной устойчивости. Калифорнийское землетрясение 1971 г. в Сан-Фернандо дало еще один толчок к исследованию землетрясений в США и привело к учреждению Конгрессом национальной программы уменьшения сейсмической опасности (NEHRP), в котором участвовало несколько агентств. Землетрясение на Аляске 1964 г. заложило фундамент для программы NEHRP, обеспечив осознание того, что опасность землетрясений является национальной проблемой, и стимулировав развитие исследования землетрясений и смежных проблем Геологической службой США и Геодезической службой прибрежных территорий. Эти усилия были объединены в 1972 г. под эгидой Геологической службы США.

Последующий прогресс в уменьшении сейсмической опасности. Землетрясение 1964 г. показало плитовую тектонику в действии. Оно стимулировало палеосейсмологические исследования зоны субдукции, сделало более понятными процессы генерации цунами, внесло свой вклад в создание национальных исследовательских программ по изучению природных катастроф и подчеркнуло необходимость значительного увеличения возможностей мониторинга. Успехи сейсмостойкого строительства, повышение готовности общества и улучшение технологии моделирования цунами различными путями связаны с землетрясением 1964 г.

В тот день полвека тому назад, помимо тех, кто непосредственно пострадал от сотрясения или цунами, только несколько ученых в мире, работавших на сейсмологических станциях, знали, какое гигантское землетрясение произошло. Сегодня быстрое определение магнитуды землетрясения, протяженности разлома и величины смещения, что улучшает оценки сотрясений и потенциальную опасность цунами, является практически само собой разумеющимся. Более того, быстрое картирование распределения сотрясаемости (с помощью сайта ShakeMaps, поддерживаемого USGS), в первую очередь с точки зрения влияния на население и сооружения, позволяет выполнять быструю оценку воздействия землетрясения (с помощью системы оценки воздействия (Prompt Assessment)), под-

держиваемой USGS как часть глобальной системы отклика на землетрясения (Global Earthquake for Responce system)), что позволяет направлять сигналы тревоги в течение минут и помогает мобилизовать и запустить реакцию на катастрофу.

Система раннего оповещения о землетрясениях, которая при благоприятных обстоятельствах позволяет получить дополнительно многие десятки секунд для предупреждения о приближающихся сильных сотрясениях почвы, уже функционируют в Японии, на Тайване, в Мексике и других местах. Система раннего предупреждения, которая в настоящее время проходит тестирование в Калифорнии и на северо-западе Тихого океана, вскоре позволит интегрировать геодезические данные с потоками сейсмических данных. Чтобы быть уверенными в том, что эти предупреждения используются эффективно, сейсмологи в настоящее время привлекают ученых, занимающихся социальными проблемами, для разработки понятных, действенных предупреждающих сообщений. Ученые признают неизбежность землетрясений, но уже

знают, что их разрушительные последствия могут быть значительно уменьшены. Разрушающее воздействие на общество может быть снижено, а восстановление облегчено благодаря улучшению проектов зданий и уточнению требований к стандартам критической инфраструктуры, что стало возможным благодаря успехам в сейсмостойком строительстве и уточнению сейсморайонирования. Правильно построенные сети мониторинга и быстрый анализ данных могут обеспечить в реальном времени эффективную информированность, необходимую для реагирования на опасность, включая действенную систему раннего оповещения о цунами и землетрясениях, сообщения которой предупреждают тех, кто может оказаться в опасности. Великое Аляскинское землетрясение 1964 г. показало, что все эти элементы необходимы и должны быть внедрены для уменьшения глобальной сейсмической опасности и опасности цунами.

Дополнительную информацию о землетрясении 1964 г. и соответствующие ресурсы можно найти на сайте <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/events/alaska1964/>.

Список литературы

- Atwater B. et al., 2005. The orphan tsunami of 1700 — Japanese clues to a parent earthquake in North America. *U. S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 1707, 144 p.
- Benioff H., 1955. Seismic evidence for crustal structure and tectonic activity. In: *Crust of the Earth. Symposium*. Ed. A. Poldervaart. *Spec. Pap. Geol. Soc. Am.* 62, 61—75.
- Hess H.H., 1962. History of ocean basins. In: *Petrologic Studies: A Volume in Honor of A.F. Buddington*. Ed. A.E.J. Engel, H.L. James, B.F. Leonard. *Geol. Soc. Am., Boulder, Colo.* 599—620.
- Hodgson J.H., 1957. Nature of faulting in large earthquakes. *Geol. Soc. Am. Bull.* 48, 611—644.
- Honda H., Masatsuka A., 1952. On the mechanism of the earthquakes and the stresses producing them in Japan and its vicinity (second paper). *Sci. Rep. Tohoku Univ. Ser. 5, 4*, 42—60.
- Irving E., 1956. Paleomagnetic and palaeoclimatological aspects of polar wandering. *Pure Appl. Geophys.* 33, 23—41.
- Kanamori H., 1977. The energy release in great earthquakes. *J. Geophys. Res.* 82(20), 2981—2987.
- Plafker G., 1965. Tectonic deformation associated with the 1964 Alaska earthquake. *Science* 148(3678), 1675—1687.
- Plafker G., 1969. Tectonics of the March 27, 1964 Alaska earthquake *U. S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 543-I, 74 p.
- Plafker G., 1967. Surface faults on Montague Island associated with the 1964 Alaska earthquake. *U. S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 543-G, 42 p.
- Plafker G., Rubin M., 1978. Uplift history and earthquake recurrence as deduced from marine terraces on Middleton Island, Alaska. *U. S. Geol. Surv. Open File Rep.* 78—943, 687—721.
- Plafker G., Savage J.C., 1970. Mechanism of the Chilean earthquakes of May 21 and 22, 1960. *Geol. Soc. Am. Bull.* 81, 1001—1030.
- Runcorn K., 1956. Paleomagnetic comparisons between Europe and North America. *Proc. Geol. Assoc. Can.* 8, 77—85.
- Stauder W., Bollinger G.A., 1966. The focal mechanism of the Alaska earthquake of March 28, 1964, and of its aftershock sequence. *J. Geophys. Res.* 71, 5283—5296.
- Wegener A., 1912. Die Entstehung der Kontinente. *Geol. Rundsch.* 3, 276—292.