

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЧАГОВ СИЛЬНЕЙШИХ ПАЛЕОЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЮЖНОЙ КАМЧАТКИ

Ландер А.В.<sup>1</sup>, Пинегина Т.К.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, [land@mitp.ru](mailto:land@mitp.ru)

<sup>2</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Детальные исследования морских аккумулятивных террас на восточном побережье Камчатки позволили выявить в их геологическом строении следы быстрых вертикальных перемещений берега относительно уровня моря. Эти явления удается сгруппировать по возрасту в несколько крупных событий, которые естественно интерпретировать как древние мегаземлетрясения. На Юге Камчатки (южнее Шипунского полуострова) выявлено три таких события за доисторический период времени, охватывающий последние ~3.5 тыс. лет по <sup>14</sup>C (1150 – 1250 <sup>14</sup>C л. н., 2400-2500 <sup>14</sup>C л. н. и 3300 – 3500 <sup>14</sup>C л. н.). Т.к. все перечисленные события произошли резко и имели меняющиеся вдоль берега амплитуды, они не связаны с колебанием абсолютного уровня моря и были проинтерпретированы как следы древних мегаземлетрясений.

События сопровождалось резким опусканием прибрежной полосы на протяжении десятков и даже сотен километров. При этом выявляется четкая закономерность в пространственном распределении амплитуд опусканий, одинаково выполняющаяся для каждого из обнаруженных событий. На рис. 1 приведен пример наиболее полно исследованного палеоземлетрясения, произошедшего в интервале 738 - 965 гг.н.э. (1150 – 1250 <sup>14</sup>C л.н.). Все побережье разделяется на два участка. Если на северо-западном побережье Авачинского залива наблюдаются опускания не превосходящие 1 м, то южнее на протяжении не менее 150 км те же события вызвали существенно большие погружения берега на 2.5 ÷ 4 м. Резкий скачок измеренных амплитуд погружений происходит на коротком участке побережья, не превышающем по протяженности 40 км.

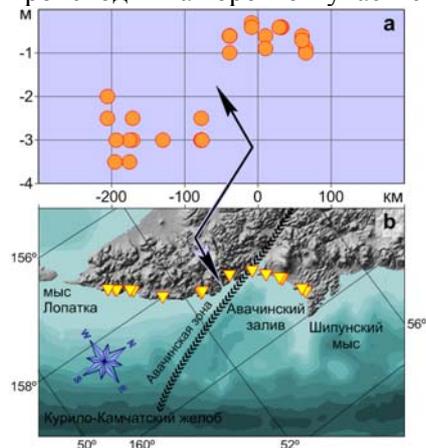


Рис.1. Амплитуды опусканий побережья Южной Камчатки при палеоземлетрясении 738 - 965 гг.н.э. **a** - результаты полевых измерений быстрых погружений берега для различных пунктов побережья, отмеченных треугольниками на **b** - карте района исследований. Координаты (км) на горизонтальных осях графика измерений и карты совпадают. Линия со стрелками отмечает участок побережья, на котором происходит резкий скачок опусканий. Показано использованное в настоящей работе предполагаемое положение поперечной Авачинской зоны.

Важно отметить, что резкое изменение амплитуд погружений происходит в окрестности пересечения берегом крупнейшей поперечной структуры Южной Камчатки. Здесь выделяется зона дислокаций юго-восточного простирания, называемая Малко-Петропавловской [2] или Начикинской [4]. Зона протянулась в юго-восточном направлении поперек основного простирания Камчатских структур примерно от южного замыкания Центрально-Камчатской депрессии к Авачинской бухте. Вполне вероятно, что она продолжается и далее в Авачинском заливе серией разломов на шельфе и континентальном склоне вплоть до глубоководного желоба [7]. Ниже мы будем называть совокупность этих наземных и подводных структур поперечной Авачинской зоной (рис. 1).

Присутствие поперечной структуры в рассматриваемом районе не ограничивается современным тектоническим этапом. На протяжении не менее чем 50 млн. лет, на различных стадиях развития Камчатки район Авачинской зоны неоднократно разделял (не обязательно в строгом соответствии с современной структурой) крупные области континентальной окраины с различной геодинамикой. Это следует из существенных различий в геологической структуре Камчатки севернее и южнее данного района, и дает возможность предполагать различие в реологии соответствующих отрезков зоны субдукции. Остановимся подробнее на последнем тезисе.

На развитие современных субдукционных процессов и связанных с ними обсуждаемых в данной работе крупнейших землетрясений наибольшее влияние могла повлиять серьезная

перестройка Камчатской зоны субдукции, произошедшая в период примерно 10 - 2 млн. лет. Согласно современным представлениям [5, 1, 12] в это время с тихоокеанской окраиной Камчатки столкнулись фрагменты потухшей мел-палеогеновой вулканической дуги, представленные в современной структуре крупными полуостровами: Шипунским, Кроноцким и, возможно, Камчатским. В результате произошло запираение зоны субдукции, следы которой сохранились западнее полуостровов. А восточнее, в результате продолжавшегося движения Тихоокеанской плиты возникла новая - современная зона субдукции, практически параллельная предыдущей. Приблизительно в тот же интервал времени на Камчатке происходит соответствующее параллельное смещение на восток активного вулканического пояса.

Однако структуры, связанные с неогеновой коллизией (и, в частности, фрагменты столкнувшейся дуги - полуострова) наблюдаются только севернее района поперечной Авачинской зоны. Южнее с более раннего времени (по крайней мере, с конца палеогена), по-видимому, продолжается стационарное погружение Тихоокеанской плиты под континент, без заметных преобразований зоны субдукции. Различия в возрастах соответствующих северного и южного сегментов сейсмофокальной зоны ярко выражено в глубинной сейсмичности. Приблизительно на линии простираения Авачинской зоны резко меняется максимальная глубина наблюдаемых землетрясений (с 650-700 км на юге до 350-400 на севере). Такой скачок глубины сейсмичности хорошо соответствует переходу от древней зоны субдукции на юге к молодой на севере, в которой слэб еще не успел достигнуть значительных глубин.

Различие между северным и южным сегментами зоны субдукции выражено и в структуре Восточно-Камчатского континентального склона. В его нижней части параллельно глубоководному желобу протянулась серия подводных хребтов-барьеров, отделяющих в рельефе дна впадины Авачинского, Кроноцкого и Камчатского заливов от океана. По-видимому, эти хребты отражают формирование аккреционных призм и, тем самым, рост внешней невулканической дуги над молодой зоной субдукции. На юге хребты-барьеры продолжают до склона Авачинского залива. Дальше на древнем южном сегменте Камчатской зоны субдукции внешняя дуга вообще отсутствует, и вновь появляется лишь в ~250 км юго-западнее, уже в Курильской части зоны, в виде подводного хребта Витязь.

В распределении мелкофокусной сейсмичности, соответствующей верхней пологой части сейсмофокальной зоны также можно заметить различие северного и южного сегментов. Согласно Камчатскому региональному каталогу [3] при пересечении Авачинской зоны в южном направлении плотность регистрируемых землетрясений быстро падает. Особенно отчетливо это заметно в полосе шириной около 100 км, прилегающей к желобу и включающей область хребтов барьеров. Здесь в северном сегменте наблюдаются многочисленные рои слабых землетрясений. В противоположность этому на южном сегменте, на протяжении не менее чем 200 км в рассматриваемой полосе отчетливо выделяется сейсмическая брешь, в которой плотность регистрируемых землетрясений примерно на порядок ниже, чем в северном.

Приведенные факты позволяют предположить, что различия в возрасте и строении северного и южного сегментов Камчатской зоны субдукции могут отражаться и в характерных параметрах очагов сильнейших землетрясений обоих районов. Южный сегмент выглядит относительно запертым, обладающим в целом большим сцеплением крыльев зоны, чем северный. Данные предположения ранее высказывались в [10] при интерпретации данных Камчатской региональной сети GNNS и в [13] на основе моделирования Камчатского цунами 1952 г.

Учитывая, что скорость пододвигания Тихоокеанской плиты под континент для двух сегментов мало отличается (до 3% [9]), из более высокого сцепления крыльев южного сегмента может следовать, что происходящие там сильнейшие землетрясения обладают меньшей частотой повторяемости и большей магнитудой. Это предположение косвенно подтверждается при сравнении высот заплесков палеоцунами на двух рассматриваемых сегментах за последние ~2000 лет [6].

Таким образом, представленный на рис.1 скачок амплитуд косейсмических опусканий побережья по своему положению хорошо вписывается в представление о двух различных сегментах современной Камчатской зоны субдукции. Измеренные амплитуды опусканий и их распределение вдоль берега дают возможность попытаться грубо оценить главные очаговые параметры соответствующего палеоземлетрясения и, в частности, возможное влияние Авачинской границы на структуру очага. При имеющемся наборе данных и многопараметрической модели очага, соответствующая обратная задача не устойчива. Поэтому при поиске решения мы привлекали кратко описанную выше априорную информацию о геологической структуре возможной очаговой области.

Решение задачи основано на известных формулах смещений свободной поверхности при внутренней точечной дислокации в однородном полупространстве [14]. Согласно имеющимся наблюдениям, рассматриваются только вертикальные смещения свободной поверхности. Комбинирование малых дислокаций в принципе позволяет моделировать движение земной поверхности, вызванное произвольным сейсмическим источником. В принятой модели очаг рассматривается как набор плоских многоугольников (субочагов) произвольной формы с разной подвижкой, но однородной в пределах каждого из них. В расчетах использовались только многоугольники, принадлежащие общей плоскости, моделирующей поверхность субдущурующей плиты. Наземный и подводный рельеф не учитывался. Модельная плоскость субдукции пересекает свободную поверхность в окрестности глубоководного желоба и имеет простирание  $217^\circ$  и наклон  $18^\circ$ . Таким образом, предполагалось, что очаг может располагаться только в пределах верхней пологой части Камчатской зоны субдукции (до глубин 50-60 км). Учитывая реальную ширину этой зоны, субочаги выбирались в пределах полосы размером  $800 \times 150$  км, повернутой длинной стороной вдоль простирания зоны субдукции. Такая максимальная протяженность очага позволяет охватить все области, которые могут оказывать существенное влияние на опускания берега в районах, для которых имеются данные. Подавляющее большинство известных в этой полосе механизмов землетрясений близко к взбросам [11]. Поэтому для большинства модельных субочагов использовалась чисто взбросовая подвижка. В некоторых случаях допускалась также небольшая сдвиговая компонента, однако в окончательных решениях она отсутствует.

После фиксации модельной плоскости субдукции задача сводится к перебору (путем проб и ошибок) различных возможных наборов многоугольников-субочагов и выбору оптимального из них, наилучшим образом соответствующего данным о погружении берега. Каждый шаг перебора состоит из двух частей. Сначала задается пробная форма субочагов. Это может быть либо сетка прямоугольников, либо набор фигур более сложной формы, построенных исходя из априорной информации о структуре региона. После фиксации формы субочагов оставшаяся часть решения обратной задачи является линейной относительно величин подвижек в каждом из них. Коэффициенты соответствующей системы уравнений находятся путем вычисления полей отдельных субочагов при подвижке равной единице. Система часто оказывается плохо обусловленной. Поэтому при обращении ее (умножением на псевдообратную матрицу) использовались дополнительные ограничения. В частности отбраковывались решения содержащие встречные подвижки.

Был промоделирован очаг палеоземлетрясения, произошедшего между 738 и 965 гг.н.э. (1150 – 1250  $^{14}\text{C}$  л. н.), для которого имеются наиболее полные данные. Амплитуды опусканий побережья для двух других палеоземлетрясений лежат в тех же пределах.

Простейший однородный очаг, охватывающий всю выбранную область позволяет оценить влияние формы береговой линии на опускания. Во внутренней части Авачинского залива берег отодвигается на северо-запад поперек общего простирания камчатских структур, располагаясь примерно на 30 км дальше от модельного очага, чем в южных районах. Такое расположение, действительно должно приводить к уменьшению амплитуды косейсмических опусканий. Однако расчет показывает, что это изменение составляет максимум 1 м, в то время как данные наблюдений фиксируют скачок амплитуд более чем на 2 м. Таким образом, причина скачка, по-видимому, содержится и в изменении характеристик очага в направлении общего простирания.

При более детальном выборе субочагов полный очаг первоначально разбивался в обоих направлениях на неравные прямоугольные ячейки. Однако выяснилось, что при имеющемся расположении точек наблюдений возможно устойчиво оценить не более 2-х независимых параметров. Во всех рассмотренных примерах эффективный ранг построенной системы линейных уравнений был равен 2 (третье сингулярное значение матрицы меньше первого на два порядка). В частности это означает, что возможно использовать разбиение только на два субочага.

Тем не менее, проведение границы между субочагами вблизи поперечной Авачинской зоны позволяет вполне удовлетворительно описать наблюдаемый скачок амплитуд опусканий берега. Мы провели данную границу по западному склону Авачинского каньона - основной структуры рельефа дна этого района. В [7] приблизительно здесь предполагается "присутствие тектонически активной в четвертичное время структуры СЗ простирания, прослеживаемой в пределах континентального склона". В нижней части склона граница проведена таким образом, чтобы ограничить с юга крайний хребет-барьер - структуру характерную для северного сегмента зоны субдукции.

В результате, предпочтительными оказались два различных решения, описывающие главные характеристики очага землетрясения, приведшего к опусканиям побережья. Первый вариант соответствует простейшему решению, содержащему единственный субочаг, охватывающий всю

область, расположенную южнее выбранной "Авачинской границы". Оценка величины подвижки составила 24 м. В северный сегмент данный очаг не продолжается. На рис. 2 представлены: график соответствия исходным данным модельных опусканий, рассчитанных в точках наблюдений, и общая карта модельных вертикальных движений земной поверхности, соответствующая данному решению. Модель удовлетворительно описывает скачок амплитуд погружений, но предполагает, что в северной части Авачинского залива амплитуды монотонно убывают при удалении от очага. Последняя тенденция в исходных данных отсутствует, хотя, возможно, это связано с ошибками измерений.

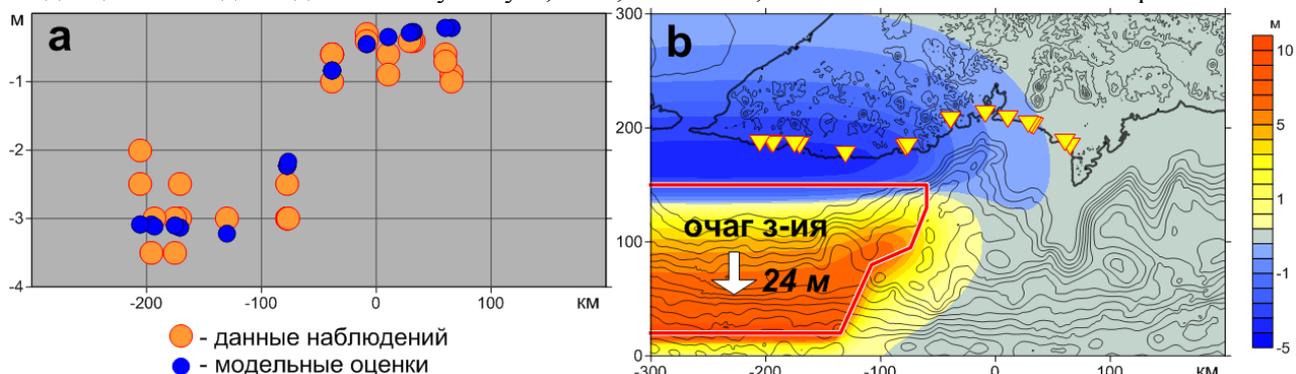


Рис.2. Модель с единственным очагом землетрясения, расположенным южнее Авачинской зоны. **a** - сравнение опусканий берега, рассчитанных в пунктах наблюдений с реальными данными, приведенными на рис.1. **b** - карта модельных вертикальных движений района, вызванных данным модельным очагом. На карте, соответствующей рис.1b: жирная линия - проекция очага на земную поверхность, белая стрелка (со значением в метрах) - подвижка висячего крыла разрыва в очаге модельного землетрясения.

Второй вариант включает дополнительный субочаг, расположенный непосредственно севернее Авачинской границы (рис. 3). Моделирование показало, что для удовлетворительного описания скачка амплитуд погружений этот субочаг должен располагаться достаточно далеко от берега. Добавление третьего субочага, расположенного во внутренней части Авачинского залива, во всех рассмотренных примерах формально (в результате решения линейной системы) приводило к обратной сбросовой подвижке в его пределах. Учитывая наложенное ограничение на направление подвижки, это означало принятие для нее нулевого значения, то есть исключение третьего субочага. Следовательно, полный модельный очаг не распространяется под внутреннюю часть Авачинского залива.

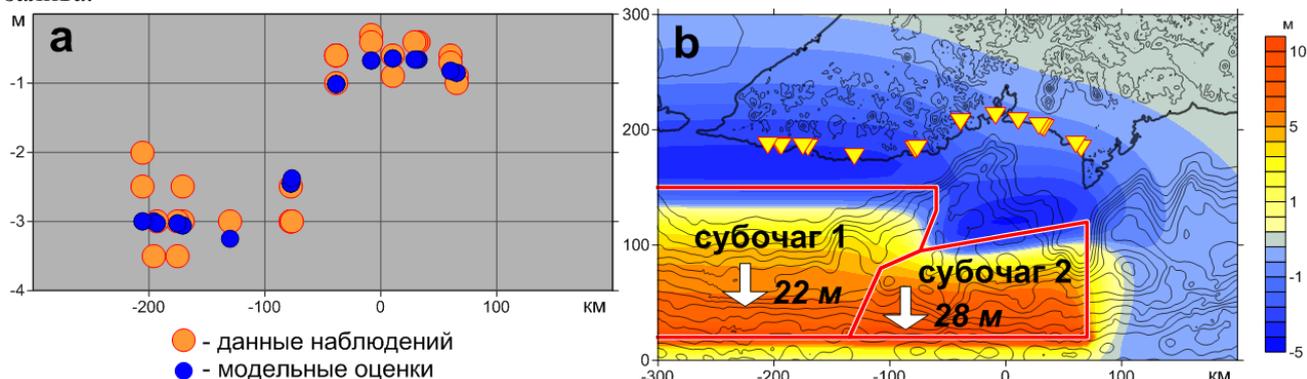


Рис.3. Модель с двумя субочагами, расположенными по разные стороны Авачинской зоны. Обозначения аналогичны рис.2.

Таким образом второй субочаг построен только под внешними областями залива, где располагается хребет-барьер (хребет Шатского), протянувшийся вдоль желоба. Северо-западная граница второго субочага выбрана исходя из структуры дна Авачинского залива. В его внутренней части располагается котловина, параллельная хребту-барьеру. Ограничение субочага приблизительно соответствует границе положительной и отрицательной структур, выраженной разломами на дне Авачинского залива [8].

Добавление второго субочага позволяет точнее, чем в первой модели, описать наблюдаемые опускания берега в северо-западной части Авачинского залива. Оценки подвижек в двух субочагах результирующей модели: 22 м для южного, 28 м для северного. Продолжение первого субочага в

южном направлении, либо второго в северном, слабо влияет на амплитуды опусканий на участке побережья, для которого мы имеем данные наблюдений.

Полученные модели позволяют оценить магнитуду палеоземлетрясения, приведшего к изучаемым погружениям побережья. Для этого сейсмические моменты субочагов вычисляются по их площади и оцененной подвижке. Для результирующей модели, состоящей из двух субочагов, такая оценка магнитуды равна 9.2. При интерпретации палео-деформаций побережья обычно трудно разделить ко- и постсейсмические процессы. Если предположить, что их амплитуды приблизительно равны, то оценка магнитуды должна быть уменьшена на 0.2 - 0.3. Кроме того следует учесть, что данная оценка является нижней, поскольку расширение модельного очага к северу или югу, приведет к возрастанию его магнитуды, но не скажется на качестве соответствия модели и данных. Окончательно получим оценку магнитуды рассматриваемого палеоземлетрясения  $M > 9$ .

Идентифицированное по геологическим данным землетрясение, по-видимому, относится к сильнейшим из произошедших в Камчаткой зоне субдукции за последние несколько тысяч лет. Соответственно, две представленные гипотетические модели могут иметь несколько различную тектоническую интерпретацию. В первом варианте можно предположить, что для сильнейших землетрясений Камчатки наибольший сброс тектонических напряжений происходят только в южном сегменте зоны субдукции (южнее поперечной Авачинской зоны), относительно запертом в промежутке времени между главными событиями.

Вторая гипотеза подразумевает, что очаги сильнейших событий могут распространяться и севернее. Экстраполируя полученные результаты, можно предположить, что для них в пределах северного сегмента зоны субдукции основные подвижки происходят только в ее внешней части (между внутренним краем хребтов-барьеров и глубоководным желобом). Меньшая ширина очагов (при сравнимых подвижках) может объяснять в целом меньшие амплитуды цунами в северном сегменте [6], по сравнению с южным. Тем не менее вторая гипотеза, на сегодня, не достаточно обоснована. Для ее проверки необходимы специальные работы по изучению и интерпретации вертикальных движений побережья на северном сегменте Камчатской зоны субдукции.

Работа поддержана РФФИ, грант № 15-05-02651-а

#### Список литературы

1. Авдейко Г.П., Попруженко С.В., Палуева А.А. Тектоническое развитие и вулcano-тектоническое районирование Курило-Камчатской островодужной системы // Геотектоника. 2002. № 4. С. 64-80.
2. Геология СССР. Том XXXI. Камчатка, Курильские и Командорские острова. М.: Недра, 1964.
3. Единая информационная система сейсмологических данных Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН. <http://www.emsd.ru/sdis/earthquake/information.php>
4. Кожурин А.И., Пономарева В.В., Пинегина Т.К. Активная разломная тектоника юга Центральной Камчатки. Вестник КРАУНЦ. 2008. № 2. С. 10-27.
5. Леглер В.А. Развитие Камчатки в кайнозой с точки зрения теории тектоники литосферных плит (источники энергии тектонических процессов и динамика плит) // Тектоника литосферных плит. М.: Ин-т океанологии АН СССР, 1977. С. 137-169.
6. Пинегина Т.К. Пространственно-временное распределение очагов цунамигенных землетрясений тихоокеанского и берингоморского побережий Камчатки по отложениям палеоцунами // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. Петропавловск-Камчатский, 2014. 43 с.
7. Селиверстов Н.И. Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. М.: Научный мир, 1998. 164 с.
8. Селиверстов Н.И. Подводные морфоструктуры Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2013. 162 с.
9. Argus, D. F., Gordon, R. G., and DeMets, C. Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. V.12. No.11. 2011. DOI: 10.1029/2011GC003751. (NNR-MORVEL56)
10. Burgmann R., Kogan M.G., Steblov G.M., Hilley G., Levin V.E., and Apel E. Interseismic coupling and asperity distribution along the Kamchatka subduction zone // *JGR*, 110, B07405. 2005. DOI:10.1029/2005JB003648.
11. Global CMT Catalog Search. <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>
12. Lander A.V., Shapiro M.N. Origen of the Kamchatka Subduction Zone // *Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region*, AGU Geophysical Monograph Series. V.172. 2007. P. 57-64.
13. MacInnes B.T., Weiss R., Bourgeois J., and Pинегина Т.К. Slip Distribution of the 1952 Kamchatka Great Earthquake Based on Near-Field Tsunami Deposits and Historical Records // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2010. V.100. P. 1695-1709.
14. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // *BSSA*. 1985. V. 75. No.4. P. 1135-1154.