

ПРИРОДА

5 11



Главный редактор академик **А.Ф.АНДРЕЕВ**

Первый заместитель главного редактора
доктор физико-математических наук **А.В.БЯЛКО**

Заместители главного редактора:

доктор физико-математических наук **А.А.КОМАР** (физика),

член-корреспондент РАН **В.В.МАЛАХОВ** (биология),

доктор геолого-минералогических наук **А.А.ЯРОШЕВСКИЙ** (науки о Земле)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

О.О.Астахова (редактор отдела биологии и медицины), кандидат химических наук
Л.П.Белянова (редактор отдела экологии и химии), доктор физико-математических наук
А.Н.Васильев (физика), доктор географических наук **А.А.Величко** (география), академик РАН **А.И.Воробьев** (медицина), академик **С.С.Герштейн** (физика), доктор биологических наук **А.М.Гиляров** (экология), академик **Г.С.Голицын** (физика атмосферы), доктор химических наук **И.С.Дмитриев** (химия), академик **Г.В.Добровольский** (почвоведение), академик **Г.А.Заварзин** (микробиология), академик **Л.М.Зеленый** (космические исследования), академик РАН **В.И.Иванов** (генетика), академик **В.Т.Иванов** (биоорганическая химия), доктор биологических наук **С.Л.Киселев** (генетика), член-корреспондент РАН **М.В.Ковальчук** (физика), **Г.В.Короткевич** (редактор отдела научной информации), **Е.А.Кудряшова** (ответственный секретарь), академик **Н.П.Лаверов** (геология), доктор геолого-минералогических наук **А.Ю.Леин** (геохимия), доктор биологических наук **А.М.Носов** (физиология растений), доктор экономических наук **В.М.Орел** (история науки), академик **Л.В.Розенштраух** (физиология животных), академик **А.Ю.Румянцев** (ядерная физика), академик **В.П.Скулачев** (биохимия), кандидат физико-математических наук **К.Л.Сорокина** (редактор отдела физики и математики), кандидат исторических наук **М.Ю.Сорокина** (история науки), кандидат физико-математических наук **В.Г.Сурдин** (астрономия), **Н.В.Ульянова** (редактор отдела геологии, геофизики и геохимии), **Н.В.Успенская** (редактор отдела истории естествознания и публицистики), академик **О.Н.Фаворский** (энергетика), академик **Л.Д.Фаддеев** (математика), академик **М.А.Федонкин** (палеонтология), академик **А.Р.Хохлов** (физическая химия), академик **А.М.Черепашук** (астрономия, астрофизика), академик **Ф.Л.Черноустько** (механика), член-корреспондент РАН **В.П.Шибяев** (химия), **О.И.Шутова** (редактор отдела охраны природы)

НА ПЕРВОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Один из многочисленных цветков соцветия плакун-травы крупным планом.

См. в номере: **Волкова О.А.** *Дербенник выбирает пыльцу для опыления.*

Фото автора

НА ЧЕТВЕРТОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Дамба высотой в несколько метров отделяет жилые дома от каналов, выходящих в Токийский залив.

См. в номере: **Пинегина Т.К.** *Землетрясение и цунами в Японии.*

Фото автора



Землетрясение и цунами в Японии

Т.К.Пинегина,
кандидат географических наук
Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
Петропавловск-Камчатский

11 марта 2011 г. в 14:46 по японскому времени в акватории Тихого океана напротив северо-восточного побережья о.Хонсю произошло сильнейшее землетрясение, вызвавшее катастрофическое цунами, которое с наибольшей интенсивностью проявилось вдоль побережья Санрику и в заливе Сендаи. Это землетрясение японские сейсмологи назвали «Тохоку-Чино Тайхсейю-Оки», или более коротко — «Тохоку» [1].

Характеристика очага землетрясения

Очаг землетрясения располагался на границе Тихоокеанской и Северо-Американской литосферных плит. Механизм его типично субдукционный, т.е. произошло поддвижение одной плиты под другую. Максимальная подвижка (амплитуда, на которую плиты проскользнули относительно друг друга) составила, по оценкам геофизиков, от 20 до 40 м. Размеры очага (примерно соответствующие области распространения афтершоков первых нескольких суток) поистине огромны — около 500 км в длину и 200 км в ширину.

Основываясь на исторической сейсмичности, японские ученые в районе очаговой области выделяли шесть сегментов (рис.1), в которых в различное время

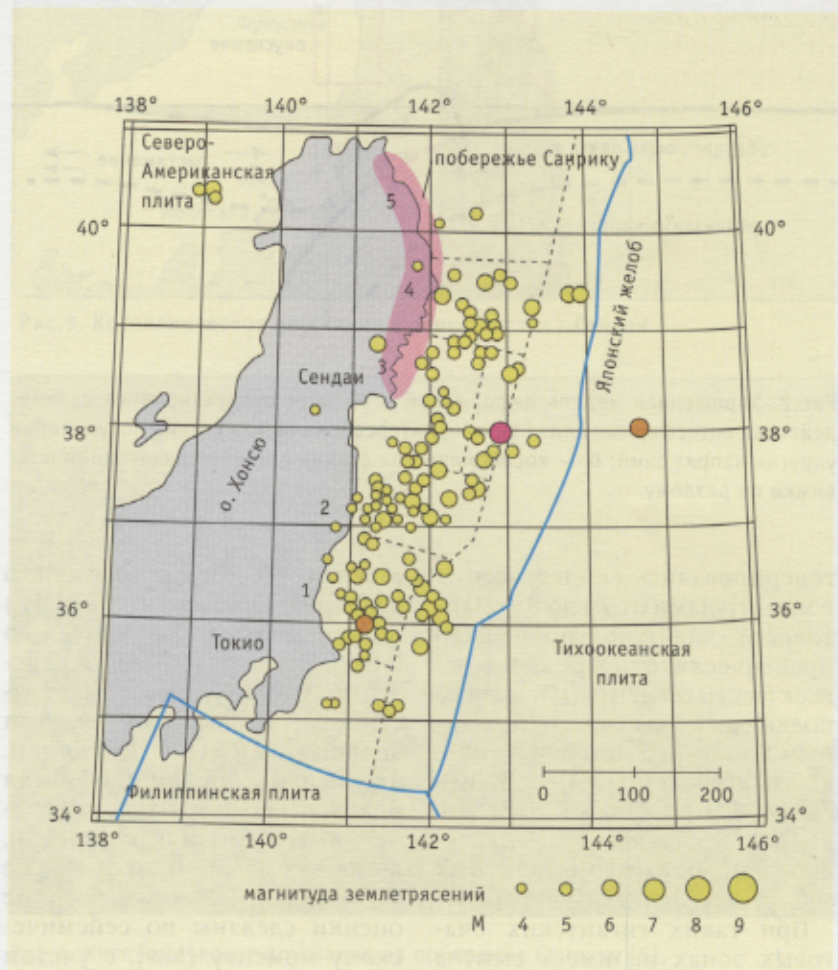


Рис.1. Распределение афтершоков, произошедших 11—13 марта 2011 г. [1]. Эпицентр главного события показан красным цветом, наиболее сильные афтершоки с $M > 7$ — оранжевым. Синими линиями показаны границы литосферных плит, пунктирными — границы шести сейсмогенирующих сегментов, выделенных по исторической сейсмичности в данной очаговой области. Цифрами на карте обозначены префектуры, наиболее сильно пострадавшие от землетрясения и цунами: 1 — Ибараки, 2 — Фукусима, 3 — Мияги, 4 — Иватэ, 5 — Аомори.

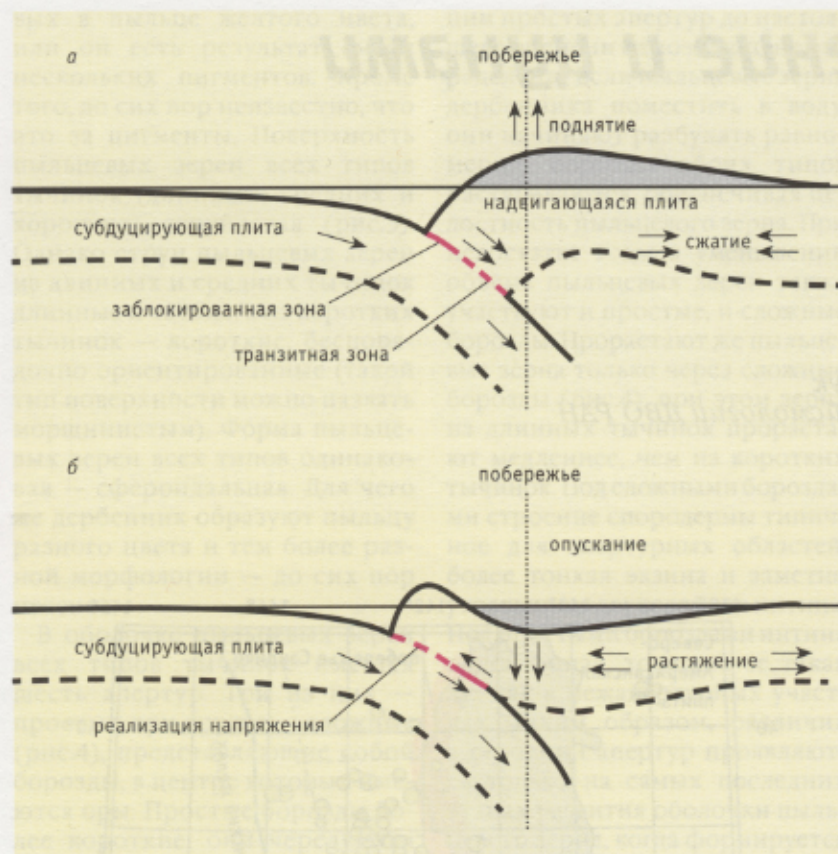


Рис.2. Упрощенная модель деформаций в области субдукционного взаимодействия литосферных плит [3]: а — интерсейсмическая стадия аккумуляции упругих напряжений; б — косейсмическая стадия в момент реализации подвижки по разлому.

генерировались землетрясения с магнитудами от 7.4 до 8.2. Мартовское событие произошло практически одновременно на всех шести сегментах. Основные подвижки по разломам, по данным Японского метеорологического агентства (JMA), длились около 5 мин. Таким образом, данное землетрясение — классический пример межплитных мультисегментных событий.

При таких гигантских очаговых зонах не имеет смысла говорить о глубине очага, так как глубина гипоцентра соответствует лишь начальной точке вспарывания. Плоскость же разрыва с наклоном 25–29° и падением на восток, под Японию, по оценкам сейсмологов, залегает в интервале от 0 до 50–60 км.

Магнитуда, определенная в течение первых минут (M_s), со-

ставляла 7.9. Спустя несколько часов значение магнитуды (M_w) было поднято до 8.8, а затем до 9.1 [2]. Такая разница в определении магнитуд для землетрясений с огромными очагами вполне закономерна. Дело в том, что первые оценки (M_s) были получены по амплитуде поверхностных сейсмических волн, когда очаговый процесс еще не закончился. Более же поздние оценки сделаны по сейсмическому моменту (M_w), с учетом длины, ширины очага и величины подвижки. Тем не менее быстрые определения эпицентра и M_s землетрясений очень важны. Именно на основании этих оценок (по так называемому магнитудно-географическому критерию) принимается решение об объявлении или отмене тревоги цунами.

Косейсмические опускания побережья и цунами

Согласно геодезическим, а в последнее время и GPS-данным, сильные межплитные землетрясения вызывают вертикальные косейсмические (не разрывные) деформации на побережьях, расположенных даже в нескольких сотнях километров от глубоководных желобов (рис.2). Наблюдения, проведенные после некоторых крупнейших исторических землетрясений (в Чили, 1960, $M_w = 9.5$; на Аляске, 1964, $M_w = 9.2$; в Индонезии, 2004, $M_w = 9.5$ и др.), показали, что земная поверхность, прилегающая к мелкой части очага (на взброшенном крыле), во время субдукционного землетрясения испытывает поднятие. В то же время область, расположенная ближе к вулканической дуге над более глубокой частью очага, опускается. Амплитуды косейсмических опусканий на побережьях, зарегистрированные за время инструментальных наблюдений, как правило, не превышали 1 м (редко достигали 2–3 м) [3].

Подобные опускания произошли и на побережье Японии. Западный край очага землетрясения находился практически под сушей. По данным японских GPS-станций, опускание было зарегистрировано во многих местах [1]. На снимке RADARSAT-2, сделанном 12 марта 2011 г. (рис.3), красными областями выделены участки берега, которые опустились и оказались ниже уровня моря [4]. Косейсмическое опускание территории и затопление суши было зафиксировано также и на аэрофотоснимках при облете пострадавших территорий (рис.4). По данным мареографов [5], первая волна цунами, не самая высокая, подошла к берегам Японии спустя 10–15 мин, а наибольшие высоты были зафиксированы через 30–40 мин после события. Однако необходимо понимать, что все мареографы, расположенные у побережья, имеют определенный «рабочий» интервал и, как правило, способ-

ны фиксировать цунами слабой и средней интенсивности. Полные записи цунами, опубликованные японскими учеными, получены на мареографах, расположенных в краевых частях очаговой области или вне ее пределов. В тех же районах, где цунами имело максимальные высоты (вертикальный заплеск превышал 10 и даже 20 м), приборы записали лишь начальные малоамплитудные колебания уровня моря. Кроме того, многие системы были повреждены и записи не сохранились. Именно в этих районах, находящихся непосредственно в очаговой области, и наблюдались косейсмические опускания. На мареограммах, выложенных JMA в Интернете, видно, что на территории от г.Сендаи до побережья префектуры Аомори малоамплитудные (± 0.5 м) изменения относительно уровня моря с периодами от нескольких минут начались сразу после землетрясения, а спустя примерно 15 мин к побережью подошли гигантские волны.

Все системы предупреждения цунами, существующие в настоящее время в мире, рассчитаны на то, что имеется некоторое время — минимум 10–15 мин — между генерацией цунами и добеганием волны до берега. В противном случае система не будет эффективна. У людей просто не хватит времени получить предупреждение и покинуть цунамиопасную зону. Однако ни одна система до сих пор не учитывает вероятности косейсмического опускания суши еще до подхода волн цунами. Что произойдет на берегу, если суша резко (уже во время землетрясения) опустится на 1–2 м? Вода начнет прибывать незамедлительно, а при подходе уже собственно волн цунами ее уровень повысится еще больше. Даже небольшого, метрового, затопления наиболее низко расположенных относительно уровня моря участков земли достаточно, чтобы осложнить или сделать вовсе невозможной срочную эвакуацию населения.

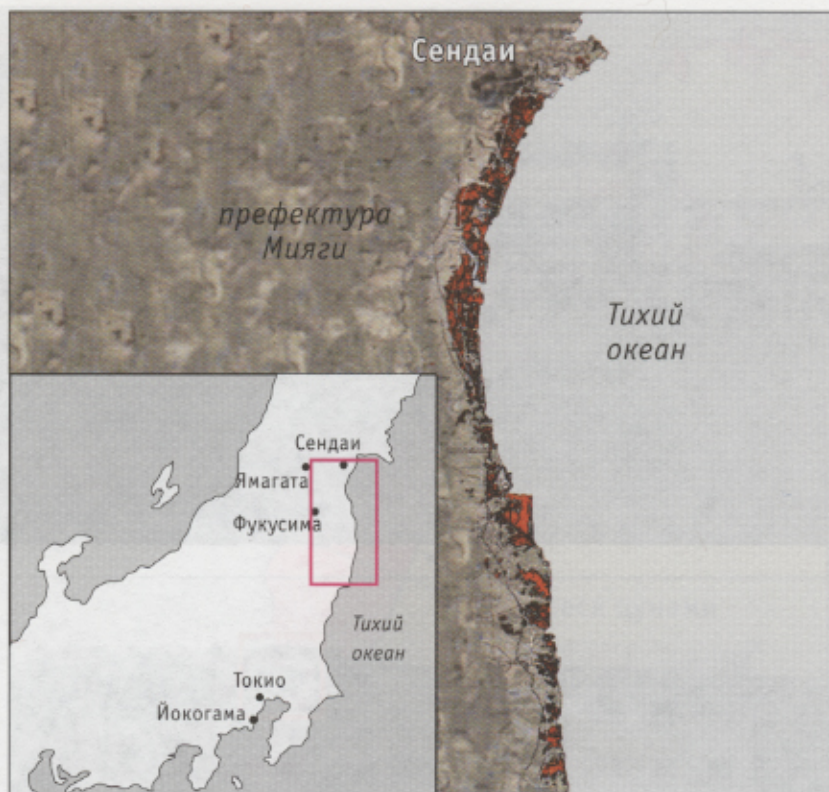


Рис.3. Косейсмическое опускание в окрестностях г.Сендаи.



Рис.4. Косейсмическое опускание на побережье Санрику [5].

Японская катастрофа: исключение или закономерность?

В начале апреля 2010 г., т.е. год назад, в г.Сендаи проходил 3-й Международный полевой симпозиум по цунами. Мы посетили северо-восточное побережье о.Хонсю от г.Сендаи до г.Камаиси на побережье Санрику. Во время полевых экскурсий нас ознакомили с системой предупреждения цунами, а также с результатами геологических исследований отложений палеоцунами на этих побережьях.

режье о.Хонсю от г.Сендаи до г.Камаиси на побережье Санрику. Во время полевых экскурсий нас ознакомили с системой предупреждения цунами, а также с результатами геологических исследований отложений палеоцунами на этих побережьях.



Рис.5. Цунамизащитные ворота и дамба в г.Минами-Санрику.

Здесь и далее фото автора

Необходимо отметить, что в Японии, как ни в одной другой стране мира, проблеме цунами уделяется очень большое внимание. Здесь установлены самые современные системы предупреждения, регулярно проводится обучение населения, разработаны пути к местам эвакуации, а сами места составляют неотъемлемую часть инфраструктуры. Правительство достаточно хорошо финансирует работы, связанные с научными исследованиями различных аспектов проблемы цунами.

Почти все прибрежные участки, даже у небольших поселков, отгорожены дамбами, ворота которых опускаются в случае угрозы цунами (рис.5). Крыши многих зданий в цунамиопасной зоне оборудованы специальными площадками для населения. Повсюду встречаются знаки, показывающие направление движения к пунктам эвакуации (рис.6). Эти меры действительно эффективны в случае небольших цунами. Однако цунами 11 марта по своей интенсивности значительно превосходило большинство исторических событий. На табличке со схемой цунамиопасной зоны в окрест-



Рис.6. Места эвакуации во время цунами, обустроенные на крышах зданий. В ряде случаев их высота оказалась недостаточной.



Рис.7. Схема цунамиопасной зоны в окрестностях г.Сендаи (а) и карта фактического заплеска (б) для того же района [5].

ностях г.Сендаи и картой заплеска (рис.7) видно, что наиболее опасной зоной (выделена красным) считались узкая полоса побережья и территория порта. На самом деле величина горизонтального заплеска составила здесь 4–5 км.

В ходе работы симпозиума мы провели бурение торфяников на побережье Сендаи (в районе, показанном на рис. 7). В кернах хорошо видны прослой морского песка, отложившиеся во время предыдущих катастрофических цунами. Оказалось, что на расстоянии 3 км от побережья за последние примерно 1500 лет отложилось всего два горизонта цунамигенного песка (рис.8), причем выявленные цунами происходили с интервалом в 300–400 лет. А между последним из них и мартовским событием этого года прошло около 1100 лет. Геологические данные [6–10] показали, что события, аналогичные нынеш-

ним, уже происходили и обычно для этого региона, хотя и достаточно редки. Период их повторяемости, по-видимому, может составлять от нескольких сотен до тысячи лет.

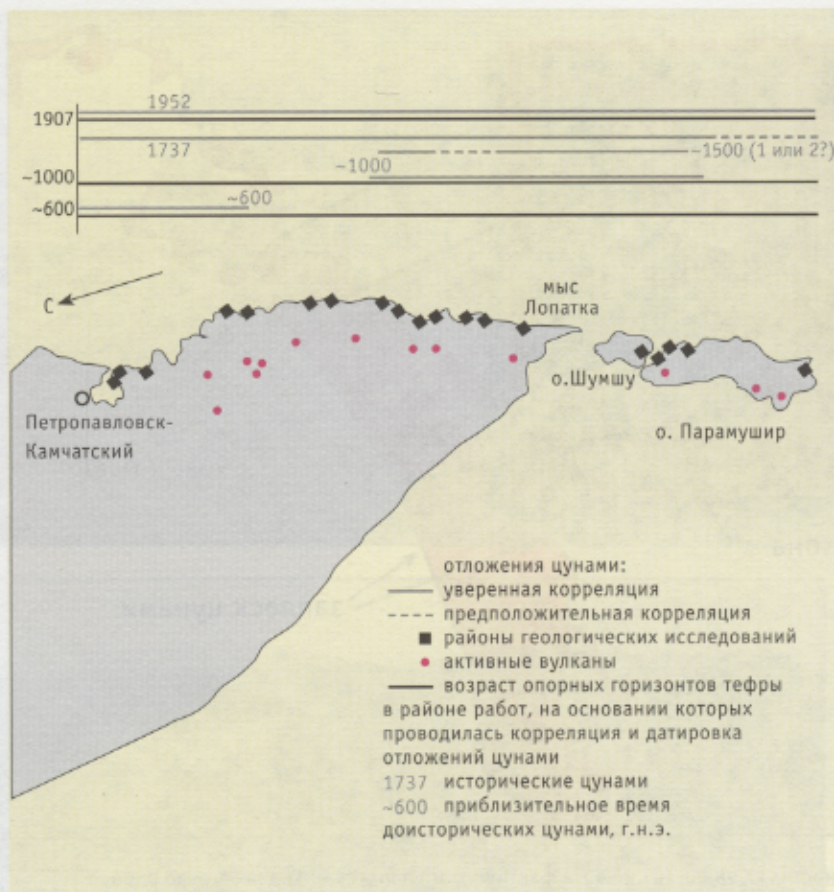
Что можно ожидать на Дальнем Востоке России?

После произошедшего события возникает вопрос: возможно ли повторение японской катастрофы на Дальнем Востоке России? Геологические исследования, проводившиеся российскими учеными на протяжении последних 15 лет [11], дают однозначный ответ. Да, возможно. Подобные события могут происходить и периодически происходят вдоль Курило-Камчатской зоны субдукции.

Так, например, при экспедиционных исследованиях в 1995–2010 гг. были проанализированы и по возможности скореллиро-



Рис.8. КERN, полученный в результате бурения прибрежного торфяника в окрестностях г.Сендаи.



ваны отложения исторических и доисторических цунами от побережья Камчатки и в районе г.Петропавловска до южной оконечности о.Парамушир. На основании этих данных выделены наиболее сильные цунами и менее значительные события для последних ~1500 лет. Было установлено, что за данный период в районе произошло как минимум

пять или шесть катастрофических цунами (т.е. в среднем одно событие в 250–300 лет) (рис.9). Три из них (около 600 г., в 1737 и 1952 гг.) сопровождалось косейсмическими опусканиями побережья с амплитудой не менее 1 м. Судя по параметрам реконструированных цунами и на основе сравнения их с историческими событиями можно



Рис.10. Памятный камень на перешейке п-ова Мизуаи. В 1896 г. цунами высотой 38.2 м пересекло перешеек. В 1933 г. высота цунами в этом месте достигла 29.2 м, 11 марта 2011 г. — около 20 м.

Рис.9. Повторяемость сильнейших землетрясений и цунами вдоль южной Камчатки и Северных Курил примерно за последние 1500 лет. Длина серых линий соответствует протяженности очагов цунамигенерирующих землетрясений вдоль Курило-Камчатской зоны субдукции [11].

предполагать, что они были вызваны землетрясениями с $M = 8-9$.

На памятном камне (рис.10), установленном на побережье Санрику неподалеку от того места, где в 1896 г. локальный заплеск составил 38.2 м, написано: «Помни о цунами, иначе оно напомнит о себе». И это справедливо не только для Японии... ■

Литература

1. <http://supersites.earthobservations.org/sendai.php>
2. CMT: Каталог, <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes>
3. *McCalpin J.P. Paleoseismology // International Geophysics series. 2009. V. 95. P.612.*
4. <http://www.unitar.org/unosat/node/44/1549>
5. <http://itic.ioc-unesco.org/index>
6. *Nanayama F., Satake K. et al. Unusually large earthquakes inferred from tsunami deposits along the Kuril trench // Nature. 2003. V.424. №6949. P.660–663.*
7. <http://unit.aist.go.jp/actfault-eq/seika/h19seika/pdf/03.satake.pdf>
8. <http://unit.aist.go.jp/actfault-eq/seika/h18seika/pdf/sawai.pdf>
9. <http://unit.aist.go.jp/actfault-eq/seika/h18seika/pdf/sawai.pdf>
10. *Sawai Y., Satake K. et al. Transient uplift after a 17-th century earthquake along the Kuril subduction zone // Science. 2004. V.306. P.1918–1920.*
11. *Pinegina T., Bourgeois J. Investigations of tsunami deposits on Kamchatka and Kuril Islands, Russia // The 3rd International Tsunami Field Symposium. Sendai, Japan, 2010. P.40–42.*

