

**АССИНОВСКАЯ Б.А.**

Ведущий научный сотрудник сейсмической станции «Пулково»
 Геофизической службы РАН, к.ф.-м.н., г. Санкт-Петербург,
 assinovskaya@plkv.gsras.ru

ГОРШКОВ В.Л.

Старший научный сотрудник Главной (Пулковской)
 астрономической обсерватории РАН,
 к.ф.-м.н., г. Санкт-Петербург

ЩЕРБАКОВА Н.В.

Научный сотрудник Главной (Пулковской) астрономической
 обсерватории РАН, г. Санкт-Петербург

ПАНАС Н.М.

Младший научный сотрудник сейсмической станции «Пулково»
 Геофизической службы РАН, г. Санкт-Петербург

ASSINOVSKAYA B.A.

A leading staff scientist of the «Pulkovo» seismic station of the
 Geophysical Service of the RAS, candidate of science (Physics and
 Mathematics), Saint Petersburg, assinovskaya@plkv.gsras.ru

GORSHKOV V.L.

A senior staff scientist of the Central (Pulkovo) Astronomical
 Observatory of the RAS, candidate of science (Physics and
 Mathematics), Saint Petersburg

SHCHERBAKOVA N.V.

A staff scientist of the Central (Pulkovo) Astronomical Observatory
 of the RAS, Saint Petersburg

PANAS N.M.

A junior staff scientist of the «Pulkovo» seismic station of the
 Geophysical Service of the RAS, Saint Petersburg

АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ, ВЫЯВЛЕННЫЕ ПО ДАННЫМ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ

ACTIVE FAULTS REVEALED IN THE BALTIC SEA USING GEODINAMIC OBSERVATION DATA

Ключевые слова: GPS; скорость; деформация; напряжение; разлом; моделирование; землетрясение.

Key words: GPS; velocity; strain; stress; fault; modeling; earthquake.

Аннотация: в работе изучено поле деформаций района пересечения Финского и Ботнического заливов с использованием данных наблюдений финских, шведских и латвийских стационарных GPS-станций, обработанных в пакете программ GIPSY 6.1.2 (JPL). Региональное поле деформаций было рассчитано и проанализировано с помощью программы GRID_STRAIN. Результаты построений сравнивались с сейсмическими данными, так как известно, что в этом районе в 1976 году произошло Осмуссаарское землетрясение значительной силы (с магнитудой $M = 4,6$). Напряженно-деформированное состояние очаговой зоны этого события было оценено с помощью программы COULOMB 3.1, а также путем анализа аналоговых сейсмограмм российских станций, записавших землетрясение. Сравнение сейсмических и GPS-результатов позволило точнее охарактеризовать активные региональные разломы. Полученные результаты могут быть использованы при проведении изыскательских работ для строительства газо- и нефтепроводов в Балтийском море.

Abstract: the strain field of the intersection region of the Gulfs of Finland and Bothnia was studied using observation data of Finnish, Sweden, Estonian and Latvian GPS stations processed by GIPSY 6.1.2 (JPL) software package. The regional strain field was calculated and analyzed using the GRID_STRAIN program. The results were compared with seismic data because it is known that the strong Osmussaar earthquake ($M = 4,6$) had occurred in this region in 1976. The deflected mode of the earthquake source zone was evaluated using the COULOMB 3.1 program as well as by analyzing analog seismograms of the Russian seismic stations that had recorded the earthquake. Comparison between the seismic and GPS results permitted to characterize the active regional faults more exactly. The obtained results can be used for surveys for construction of gas and oil pipelines in the Baltic Sea.

Введение

Балтийское море является местом сооружения таких ответственных объектов, как нефте- и газопроводы, например, в настоящее время в процессе строительства находится широко известный газопровод «Северный поток». На его берегах расположено несколько

атомных станций, планируется сооружение новых реакторов и могильников ядерных отходов. При проведении необходимых для строительства указанных объектов инженерных изысканий в геологически закрытых и морских районах Балтийского региона могут быть с успехом применены методика и

результаты картирования активных разломов методами GPS и сейсмологии, которые описываются в данной статье.

Ранее [4] по данным GPS-наблюдений на перманентных и полевых станциях в районе «Ладожское озеро — Финский залив» было исследовано поле современных деформаций ($\Delta L/L$)

земной коры. Анализ карты деформаций позволил предположить, что границы областей с различным типом напряженного состояния могут указывать положение активных региональных разломов. При этом полученные результаты не противоречили сведениям по тектонике региона и механизмам очагов землетрясений.

Данная работа территориально охватывает район слияния Ботнического и Финского заливов с Балтийским морем. Эта область характеризуется значительным уровнем исторической и современной сейсмической активности. Именно здесь 25 октября 1976 года произошло известное Осмуссаарское землетрясение, которое ощущалось на расстоянии до 600 км от эпицентра. Оно имело следующие параметры: магнитуду $M = 4,6$, глубину очага 13 км, интенсивность в эпицентре $I_0 = 6 \div 7$, время в очаге 08 ч 39 м 47,4 с, координаты эпицентра $59,36^\circ$ с.ш. (+5,0 км), $23,34^\circ$ в.д. (+4,6 км). Это землетрясение до сих пор считается одним из сильнейших сейсмических событий в регионе.

Очаговая зона данного события изучалась специальным образом с установкой дополнительных сейсмических станций Н.К. Булиным [1]. В процессе мониторинга был исследован скоростной разрез земной коры и локализованы два афтершока на глубине 13 км. Интересно, что эпицентры последних располагались на расстоянии 6–9 км к

юго-юго-востоку от основного толчка, а линия, соединяющая эпицентры оснóвного толчка и афтершоков, приблизительно совпала по простиранию с одной из плоскостей разрыва, установленной в результате решения механизма очага (рис. 1).

В работе [12] описаны результаты исследований по моделированию механизма очага Осмуссаарского землетрясения с использованием поверхностных волн аналоговых сейсмограмм, записанных скандинавскими станциями, которые располагались на угловых расстояниях от эпицентра 1–10°. Было установлено, что в процессе землетрясения произошла подвижка главным образом сдвигового типа, содержащая небольшую взбросовую компоненту (см. рис. 1). При этом могли быть реализованы две возможные плоскости разрыва — субмеридиональная и субширотная. Первая плоскость параллельна простиранию Эстонской береговой линии, вторая совпадает по простиранию с южным берегом Финского залива. По первой плоскости разрыва произошел левосторонний сдвиг, по второй — правосторонний. Надо отметить, что на геологической карте фундамента Финского залива [11] обнаруживаются нарушения обоих направлений, а для субширотного разлома даже известны поверхностные проявления. На рисунке 1 из работы [12] дополнительно нанесены эпицентры землетрясений 1979–2008 годов, кото-

рые выстраиваются, однако, в цепочку, имеющую субмеридиональное направление. В работе [12], кроме того, приводятся сведения об очаговых параметрах землетрясения, в частности о сейсмическом моменте, который оказался равным $3,5 \times 10^{15}$ Н·м, и падении напряжения, равном 15 бар, или 1,5 МПа. Поскольку в работе [12] использовались станции, расположенные с одной стороны от эпицентра, было решено дополнить эти результаты анализом сейсмограмм российских сейсмических станций «Обнинск» и «Москва», расположенных восточнее очага. Кроме того, полезно сравнить полученные значения с приведенными в работе [6] параметрами, рассчитанными для Калининградского землетрясения 2004 года.

Целью данного исследования является построение карты горизонтальных деформаций земной коры района сочленения Финского и Ботнического заливов с использованием анализа GPS и сейсмологических данных об Осмуссаарском землетрясении 1976 года. Для выявления положения активных разломных зон в регионе используются полученные авторами независимые GPS-оценки о кинематике станций, результаты анализа данных механизма очага указанного события с применением новых методик исследования, дополнительные данные о размерах и энергетике очаговой области Осмуссаарского землетрясения. Совокупность

Таблица 1

Периоды наблюдений, координаты и остаточные скорости V_e и V_n (восточная и северная компоненты) горизонтальных движений исследуемых GPS-станций					
Станция	Период наблюдений (годы)	Долгота, ° в.д.	Широта, ° с.ш.	V_e , мм/год	V_n , мм/год
LEK0	2007–2009	14,877	60,722	-0,10±0,05	-0,66±0,06
NOR0	2007–2009	16,246	58,590	0,13±0,05	-0,78±0,05
MAR6	2007–2011	17,258	60,595	0,74±0,03	-0,70±0,03
UPP0	2007–2009	17,590	59,865	0,21±0,05	-1,02±0,04
VIS0	2007–2011	18,367	57,654	0,56±0,03	-0,93±0,02
LOV0	2007–2009	17,829	59,338	-0,19±0,05	-1,08±0,05
METS	2007–2011	24,395	60,217	1,15±0,03	-0,63±0,03
SUUR	2007–2011	24,380	59,464	0,85±0,05	-1,19±0,05
KURE	2008–2011	22,510	58,256	0,81±0,04	-0,99±0,03
LIEP	2006–2009	21,006	56,511	-0,51±0,04	-1,09±0,03
VENT	2006–2010	21,548	57,391	0,30±0,03	-0,99±0,03
VAL0	2008–2011	25,406	57,536	0,61±0,04	-1,17±0,04
RIGA	2007–2011	24,059	56,949	0,24±0,03	-0,49±0,03
KULD	2006–2009	21,959	56,969	0,14±0,04	-0,77±0,03
OLKI	1999–2008	21,473	61,240	0,92±0,04	-1,22±0,06
TUOR	1999–2008	22,443	60,416	0,74±0,03	-1,31±0,05

полученных результатов позволит получить новые сведения о блоково-разломной структуре коры района исследования, ее динамике и кинематике.

Характеристика исходных данных и методика исследований

Исходными данными для оценки горизонтальных скоростей движения станций в исследуемом регионе являлись результаты GPS-наблюдений (RINEX-файлы) постоянных сейсмических станций Финляндии, Швеции, Латвии и Эстонии за период 1999–2011 годов. GPS-наблюдения станций, вхо-

дящих в международную глобальную GPS-сеть (IGS), были взяты из архивов IGS (<ftp://igs.bkg.bund.de/EUREF/obs/>; <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/data/daily/>). Данные по латвийской GPS-сети LATPOS были взяты с соответствующего латвийского сайта (<http://www.latpos.lgia.gov.lv/spiderweb/firmIndex.aspx>). Данные GPS-наблюдений сети шведских станций SWEPOS были любезно предоставлены авторам контрольным центром сети.

Среднесуточные положения станций были вычислены с помощью пакета программ GIPSY-OASIS (GIPSY 6.1.2,

Release Notes, 2012). По этим данным после учета атмосферных нагрузок [10] были вычислены скорости станций. В таблице 1 и на рис. 2, а приведены остаточные скорости станций после учета вращения Евроазиатской плиты в системе ITRF2005 [3]. Скорости финских станций OLKI и TOUR, не входящие ни в одну из вышеперечисленных групп данных, были взяты из работы [8].

Поле деформаций моделировалось по скоростям станций с помощью пакета GRID_STRAIN [13] (рис. 2, б). Поле напряжений в очаговой зоне Осмуссаарского землетрясения 1976 года было построено с помощью программы COULOMB 3.1 [14] (<http://earthquake.usgs.gov/research/modeling/coulomb/>).

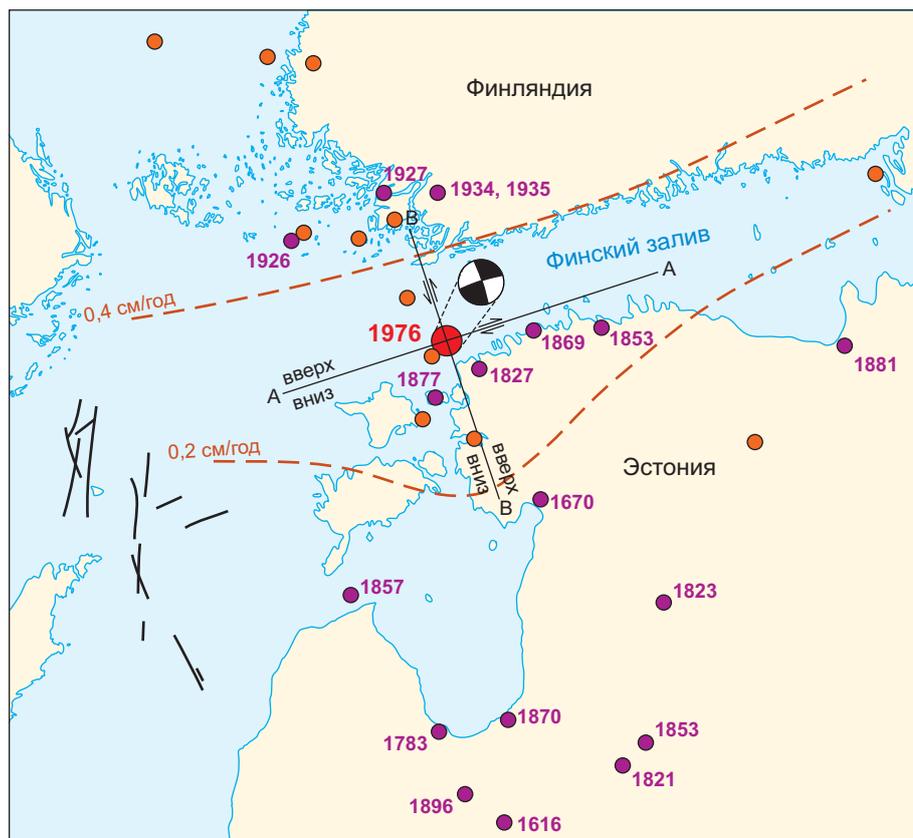
Специальные вычислительные программы были использованы для получения цифровых моделей аналоговых сейсмограмм СХ, СКМ, СКД станций «Москва» и «Обнинск» и расчета очаговых спектров Осмуссаарского землетрясения 1976 года. Копии сейсмограмм и данные об аппаратных параметрах были любезно предоставлены архивом Геофизической службы РАН.

Результаты обработки исходных данных

На рисунке 2, б видно, что генеральное СЗ-ЮВ направление движений, соответствующее движению микроплиты, в некоторых местах нарушается. Эта нерегулярность ориентации векторов скоростей может возникать под влиянием активной разломной тектоники, имеющей место в Финском и Ботническом заливах.

Из рисунка 2, б также следует, что поле деформаций в регионе очень неоднородно. Карта демонстрирует присутствие в земной коре данного региона, по крайней мере в ее верхней части, нескольких блоков с различными типами напряженного состояния — от сдвига до полного одноосного растяжения. Таким образом, можно предположить, что на западе региона более распространены условия растяжения, к которым добавляются сжимающие усилия при перемещении на восток, в направлении Финляндии. Можно отметить, что Северо-Латвийский регион находится под воздействием сдвиговых усилий.

Для окончательного выбора плоскости разрыва в очаге Осмуссаарского землетрясения 1976 года результаты, полученные по данным GPS, не могут считаться однозначными в связи с недостаточным количеством точек наблюдений, например, явно ощущается нехватка хотя бы еще одной станции



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ:

- 1976 ● Эпицентр землетрясения 1976 года.
- //— Возможные плоскости разрыва
- ⊗ Механизм очага: черные области обозначают сжатие, белые – растяжение
- 1783 ● Макросейсмические эпицентры и годы
- Эпицентры, инструментально зарегистрированные в 1976–2008 гг.
- 0,2 см/год — Кривые современных поднятий
- Разломы

Рис. 1. Положение эпицентральной зоны Осмуссаарского землетрясения из [12] с добавлениями авторов

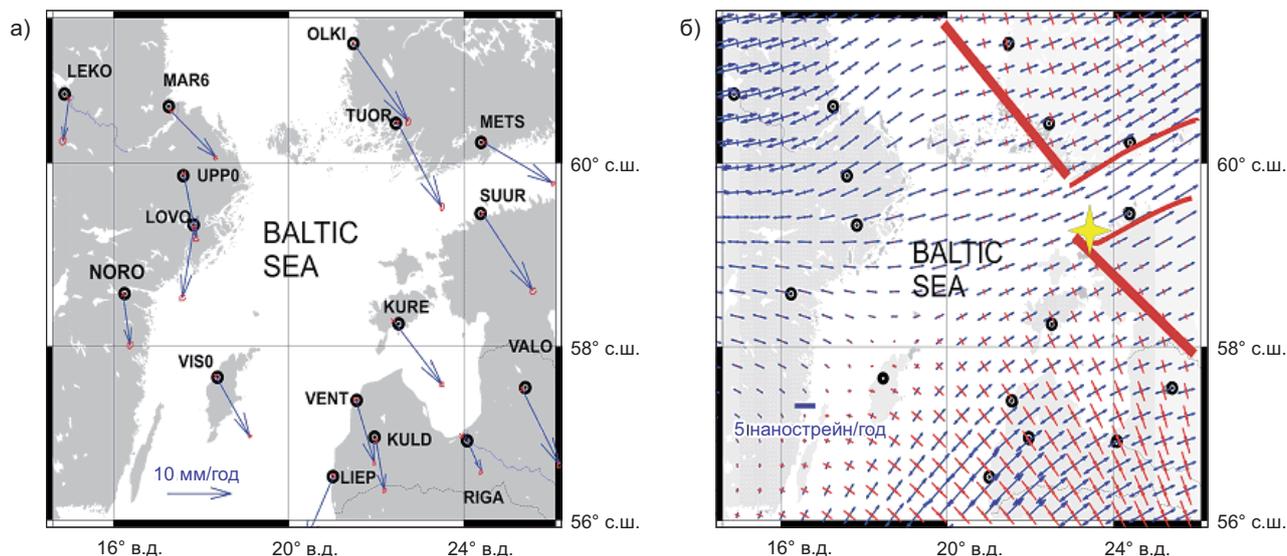


Рис. 2. Скорости движения GPS-станций и поле деформаций: а — остаточные скорости движения GPS-станций относительно Евразийской плиты (голубые стрелки), их ошибки (красные кружки) и положения станций GPS (черные кружки); б — поле деформаций $\Delta L/L$ (нанострейн/год), построенное с помощью табл. 1 и программы [13] (синие и красные стрелки — значения горизонтальных растяжения и сжатия соответственно; поле деформаций вычислено на сетке 50×50 км; красные жирные линии — предполагаемые активные разломы, желтая звезда — очаг Осмуссаарского землетрясения)

на побережье в Эстонии. Тем не менее генеральная ориентация полученных деформаций совпадает с простиранием плоскостей разрыва, установленных по решению механизма очага. В какой-то мере обе плоскости разрыва, субмеридиональная и субширотная, могли быть активными. При этом можно отметить удивительную консервативность динамических характеристик земной коры, когда напряженное состояние, установленное по данным 1976 года, оказывается примерно таким же через 20–30 лет. Или можно сказать по-другому: поле напряжений и деформаций есть постоянная региональная характеристика коры, которая проявляется в сейсмическом процессе. Последнее обстоятельство было использовано авторами при оценке сейсмической опасности региона.

Для изучения поля напряжений района был использован еще один метод моделирования, а именно построение поля изменений напряжений Кулона в очаговой области. Для обоих вариантов разрыва в очаге, определяемых из механизма очага Осмуссаарского землетрясения, были построены карты изменений этого параметра (рис. 3). В соответствии с теорией метода область положительных изменений напряжений Кулона, ее геометрические размеры и форма совпадают в плане и по простиранию с зоной трещиноватости, возникающей в ходе сейсмического разрушения, то есть с направлением активного разлома. В случае Осмуссаарского землетрясения область положительных

значений параметра возникает в случае первой плоскости разрыва (субмеридионального простирания). Размеры области достигают 3 км (рис. 3, а). Во втором случае (рис. 3, б) размеры области разрушения в плане малы, то есть зона разрушения, вероятно, имеет вертикальное простирание, что не совпадает с преимущественно сдвиговым характером разрыва. Можно вспомнить, что афтершоки также возникли к юго-востоку от основного толчка. В том же субмеридиональном направлении развивается и современная сейсмичность (см. рис. 1).

Все изложенные факты позволяют предположить, что в очаге Осмуссаарского землетрясения предпочтительной плоскостью разрыва следует считать субмеридиональную.

В последней части работы была предпринята попытка получить дополнительные данные об очаговых параметрах Осмуссаарского землетрясения 1976 года. С этой целью была осуществлена оцифровка аналоговых сейсмограмм некоторых российских станций. Процесс получения цифровых данных помимо собственно оцифровки включал в себя масштабирование, сглаживание, введение поправок за аппаратуру (деконволюцию), построение амплитудных спектров в скоростях и смещениях движений [7]. На рисунке 4 приведен амплитудный спектр смещения записи землетрясения станцией «Москва» (сейсмографом СХ). Угловая частота f_c оказалась равной 1,4 Гц. Следовательно, радиус очага [7]:

$$R_{\text{оч}} = V_s \cdot K_s / (2\pi \cdot f_c),$$

где V_s — скорость поперечных волн; K_s — эмпирический коэффициент, зависящий от геометрии области сейсмического источника.

Если $K_s = 2,34$ [5], то $R_{\text{оч}} = 958$ м. При $K_s = 1,36$ [9] $R_{\text{оч}} = 557$ м. Падение напряжения, рассчитанное по формуле $\Delta\sigma = 7M_0 / (16R_{\text{оч}}^3)$ (где M_0 — сейсмический момент), оказалось равным 1,7 и 8,9 МПа соответственно.

В таблице 2 сведены все имеющиеся данные об очаговых параметрах Осмуссаарского землетрясения 1976 года в сравнении с Калининградским землетрясением 2004 года [2, 6]. Из нее видно, что результаты данной работы в части оценок падения напряжения не отличаются от полученных в работе [12], если использовать модель Бруна, даже несмотря на то что в нашем случае угловая частота оказалась меньше. Величина падения напряжения существенно зависит от того, по какой модели она рассчитывается. Значение этого параметра оказывается в 4 раза больше для Осмуссаарского землетрясения в случае использования [9]. Оказывается, что размеры очагов Осмуссаарского и Калининградского землетрясений равны, но при этом второе событие было существенно сильнее — соответственно, сейсмический момент и падение напряжения примерно на порядок больше. Отсюда следует, что энергетика коры в очаге Калининградского землетрясения существенно выше, нежели в районе Осмуссаарского события. В

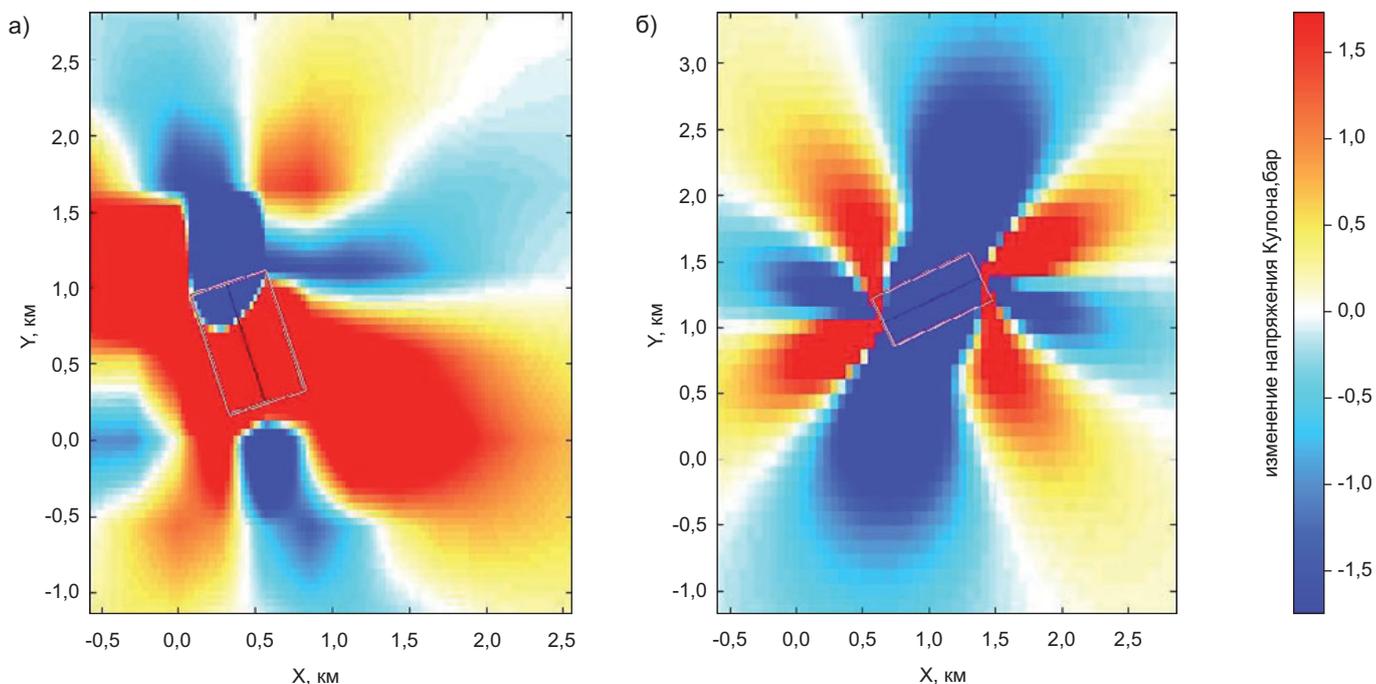


Рис. 3. Изменения напряжения Кулона (бар) в очаге Осмуссаарского землетрясения 1976 года, построенные с помощью программы COULOMB 3.1 [14]. Механизм очага по [12]: а — плоскость I (простираение 162°, падение 69°, подвижка 17°); б — плоскость II (простираение 65°, падение 74°, подвижка -158°) (см. рис. 1)

среднем все указанные параметры соответствуют мировым значениям [7].

Заключение

В данной работе были обработаны наблюдения стационарных GPS-станций, расположенных в Финско-Ботнической области, захватывающей район возникновения сильнейшего в регионе Осмуссаарского землетрясения 1976 года. Некоторые данные были обработаны впервые. Информация о скоростях GPS-перемещений была проанализирована с целью получения сведений о характере современной геодинамики в регионе. Была составлена карта горизонтальных деформаций. Вид деформаций по GPS-данным не противоречит решению механизма очага Осмуссаарского землетрясения,

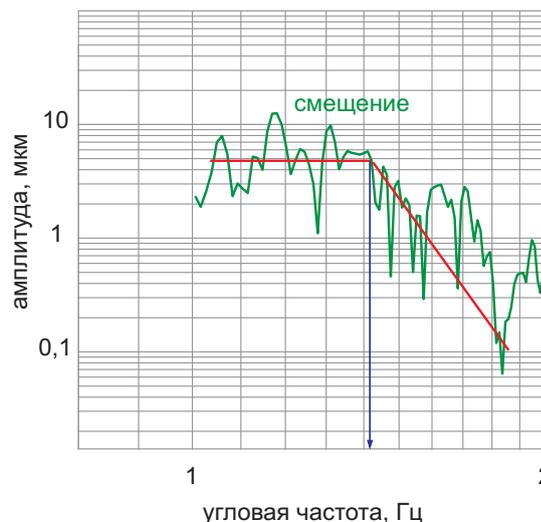


Рис. 4. Амплитудный спектр смещений для сейсмической станции «Москва» (сейсмограф СХ). Красной линией обозначены гладкая и наклонная части спектра. Синяя стрелка показывает значение угловой частоты

Таблица 2

Сравнительные характеристики очаговых параметров Осмуссаарского (1976 г.) и Калининградского (2004 г.) землетрясений

Землетрясение	Сейсмический момент, Н·м	Магнитуда	Падение напряжения, МПа	Радиус очага, м	Угловая частота, Гц
Осмуссаарское (по [12])	$3,5 \times 10^{15}$	$m_b = 4,5$ $M_w = 4,2$	1,5	1000	3*
Осмуссаарское (данная работа)	$3,5 \times 10^{15}$	$m_b = 4,5$ $M_w = 4,2$	1,7 8,9	958 557	1,4
Калининградское (по [2])	$7,2 \times 10^{16}$	$M_w = 5,2$	37,4	945	1,1

* Из устного сообщения R. Slunga.

что подтверждает реальность полученных построений. На полученной карте обнаруживаются области с разными типами напряженно-деформированного состояния. Границы между

ними можно рассматривать как активные на современном этапе и поэтому опасные тектонические нарушения. Другими словами, земная кора изучаемого региона представляет собой

сложную динамическую блоково-разломную структуру, геометрия которой должна учитываться при проведении работ по инженерным изысканиям на акватории.

Список литературы

1. Ананьин И.В., Булин Н.К., Клааманн Э.Р. Осмуссаарское (Эстонское) землетрясение 25 октября 1976 г. // Землетрясения в СССР в 1976 г. М., 1980. С. 91–97.
2. Ассиновская Б.А., Овсов М.К. Сейсмотектоническая позиция Калининградского землетрясения 21 сентября 2004 года // Физика Земли. 2008. № 9. С. 32–43.
3. Altamimi Z., Collilieux X., Legrand J., Garayt B., Boucher C. ITRF 2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth orientation parameters // Journal of Geophysical Research. V. 112. B09401. doi:10.1029/2007JB004949.
4. Assinovskaya B., Shchukin J., Gorshkov V., Shcherbakova N. On recent geodynamics of the Eastern Baltic Sea region // Baltica. 2011. V. 24. № 2. P. 61–70.
5. Brune J.N. Tectonic stress and spectra of seismic shear waves from earthquakes // Journal of Geophysical Research. 1970. V. 75. P. 49997–5009.
6. Gregersen S., Wiejacz P., Debski W. et al. The exceptional earthquakes in Kaliningrad District, Russia on September 21, 2004 // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2007. V. 164. № 1–2. P. 63–74.
7. IASPEI new manual of seismological observatory practice / Ed. by P. Bormann. Potsdam: GeoForschungsZentrum, 2002. 1252 p.
8. Lidberg M., Jonsson J.M., Scherneck H.-G., Milne G.A. Recent results base on continuous GPS observations of the GIA process in Fennoscandia from BIFROST // Journal of Geodynamics. 2009. doi:10.1016/j.jog.
9. Madariaga R. Dynamics of an expanding circular fault // Bulletin of the Seismological Society of America. 1976. V. 66. P. 639–666.
10. Petrov L., Boy J.-P. Study of the atmospheric pressure loading signal in VLBI observations // Journal of Geophysical Research. 2004. V. 109. № B03405. doi:10.1029/2003JB002500.
11. Precambrian basement of the Gulf of Finland and surrounding area. Map, scale 1:1 000 000 / Ed. by T. Koistenen. Espoo, Finland: Geological Survey of Finland, 1994.
12. Slunga R. Source mechanism of a Baltic earthquake inferred from surface wave recordings // Bulletin of the Seismological Society of America. 1979. V. 69. № 6. P. 1931–1969.
13. Teza G., Pesci A., Galgaro A. Grid_strain and grid_strain3: Software packages for strain field computation in 2D and 3D environments // Computers & Geosciences. 2008. V. 34. № 9. P. 1142–1153.
14. Toda S., Stein S.R., Richards-Dinger K., Bozkurt S. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer // Journal of Geophysical Research. 2005. 110.B05S16. doi:10.1029/2004JB003415.