

АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ, УСТАНОВЛЕННЫЕ ПО ДАННЫМ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ

АССИНОВСКАЯ Б.А.

Ведущий научный сотрудник Геофизической службы РАН, сейсмической станции
Пулково, Санкт-Петербург
assinovskaya@plkv.gsras.ru

ГОРШКОВ В.Л.

Старший научный сотрудник Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН,
Санкт-Петербург

ЩЕРБАКОВА Н.В.

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

ПАНАС Н.М.

Младший научный сотрудник Геофизической службы РАН, сейсмической станции
Пулково, Санкт-Петербург

Аннотация

В работе изучено поле деформации района пересечения Финского и Ботнического заливов с использованием обработанных пакетом GIPSY 6.1.2 (JPL) данных GPS-наблюдений финских, шведских и латвийских станций. Региональное поле деформаций было рассчитано и проанализировано с помощью программы GRID_STRAIN [12]. Результаты построений сравнивались с сейсмическими данными, так как известно, что в этом районе в 1976 году произошло Осмуссаарское землетрясение значительной силы с $M = 4.6$. Напряженно-деформированное состояние очаговой зоны этого события было оценено с помощью программы COULOMB 3.1 [13], а также путем анализа аналоговых сейсмограмм российских станций, записавших землетрясение. Сравнение сейсмических и GPS результатов позволило точнее характеризовать активные региональные разломы. Полученные результаты могут быть использованы при проведении изыскательских работ под строительство газо- и нефтепроводов в Балтийском море

Ключевые слова

GPS, скорость, деформация, напряжение, разлом, моделирование, землетрясение

Введение

Балтийское море является местом сооружения ответственных объектов, таких как нефте- и газопроводы, например, широко известный газопровод «Северный поток» в настоящее время находится в процессе строительства. На берегах Балтийского моря ведется строительство новых атомных станций, а также планируется сооружение могильников ядерных отходов. Данное исследование описывает методику и результаты картирования активных разломов методами GPS и сейсмологии, которые могут быть с успехом применены при проведении работ по инженерным изысканиям в недоступных и покрытых водой районах.

Ранее [3] 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. Землетрясение имело следующие параметры: магнитуду m_b 4.5, глубину очага 13 км, интенсивность в эпицентре $I_0=6-7$, время в очаге 08 ч 39 м 47.4 с, координаты эпицентра 59.36 N° (+5.0 км) 23.34 E° (+4.6 км). Данное событие до сих пор считается одним из сильнейших 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 основной толчок и афтершоки, приблизительно совпала по простиранию с одной из плоскостей разрыва, установленной в результате решения механизма очага (рис.1).

В работе [11] описаны исследования по моделированию механизма очага землетрясения с использованием поверхностных волн аналоговых сейсмограмм, записанных скандинавскими станциями, которые располагались на расстояниях от эпицентра 1-10°. Было установлено, что в процессе землетрясения произошла подвижка, главным образом, сдвигового типа, но которая содержала небольшую взбросовую компоненту (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, соответственно, правосторонний. Надо отметить, что на геологической карте фундамента Финского залива [10] обнаруживаются нарушения обоих направлений, а для субширотного разлома даже известны поверхностные проявления.

На рис. 1 из работы [11] дополнительно нанесены эпицентры землетрясений 1979-2008 годов, которые выстраиваются, однако, в цепочку, имеющую субмеридиональное направление.

В настоящей работе для выявления положения активных разломных зон, ответственных за возникновение Осмуссаарского землетрясения 1976 года используются как полученные авторами независимые GPS оценки о кинематике станций, так и новые методики анализа данных механизма очага данного события. Оба метода позволили построить модели распределения напряжений и деформаций в районе возникновения землетрясения и сделать определенные выводы.

В работе [11] кроме того, приводятся сведения об очаговых параметрах землетрясения, в частности, сейсмическом моменте, который оказался равным 3.5×10^{15} Н×м и падении напряжения, равном 15 бар или 1.5 МПа. Поскольку в работе 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, показалось интересным сравнить полученные значения с приведенными в работе [5] параметрами, рассчитанными для Калининградского землетрясения.

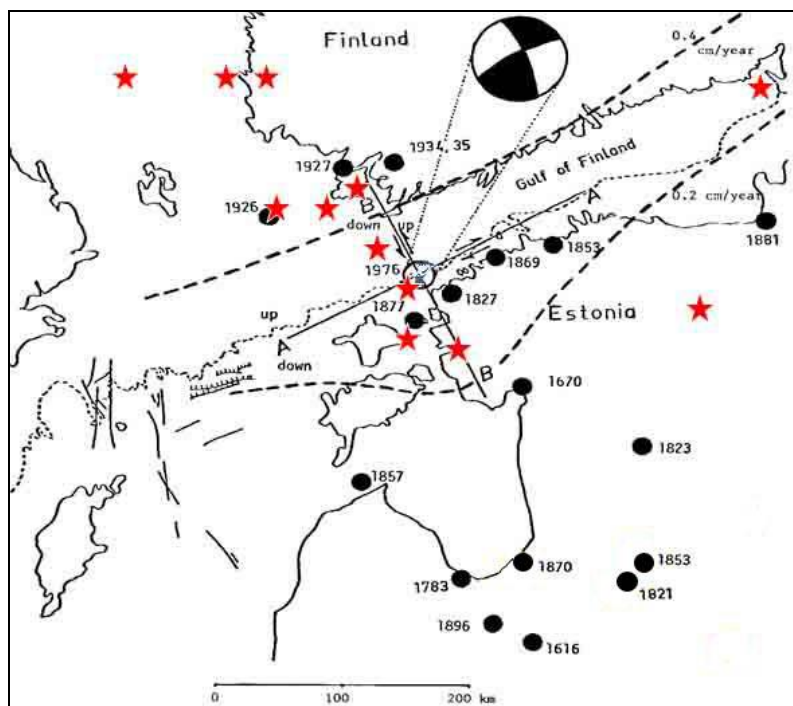


Рис.1. Положение Осмуссаарского землетрясения [11] с добавлениями авторов). Открытый кружок обозначает эпицентр землетрясения 1976 года. Черные кружки – макросейсмические эпицентры. Красные звездочки маркируют положение эпицентров, зарегистрированных инструментально в 1976-2008 году. Прямые линии AA и BB показывают ориентацию двух возможных плоскостей разрыва. Две пунктирные линии обозначают кривые современных поднятий со скоростью 0.2 см/год (верхняя линия) и 0.4 см/год (нижняя линия). Пунктирные линии в Балтийском море – разломы. Механизм очага: черные области обозначают сжатие, белые – растяжение

Как известно, Балтийское море является местом сооружения ответственных объектов, таких как нефте- и газопроводы, например, известный газопровод «Северный поток», находится в процессе строительства в настоящее время. На берегах Балтийского моря расположено несколько атомных станций, планируется сооружение могильников ядерного топлива и новых реакторов. Методика и результаты картирования активных разломов методами GPS и сейсмологии в геологически закрытых и морских районах могут быть с успехом применены при проведении работ по инженерным изысканиям.

Характеристика данных и применяемая методика

Исходными данными для оценки скоростей станций в исследуемом регионе являлись GPS-наблюдения (RINEX файлы) перманентных станций Финляндии, Швеции, Латвии и Эстонии за период 1999-2011 годов. GPS-наблюдения станций, входящих в международную глобальную GPS сеть (IGS), были взяты из архивов IGS (<ftp://igs.bkg.bund.de/EUREF/obs/> и <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/data/daily/>). Данные по латвийской GPS-сети LATPOS были взяты на их сайте (<http://www.latpos.lgia.gov.lv/spiderweb/frmIndex.aspx>). GPS-наблюдения сети шведских станций SWEPOS были любезно предоставлены нам контрольным центром сети.

Среднесуточные положения этих станций были вычислены с помощью пакета GIPSY-OASIS (GIPSY 6.1.2, Release Notes, 2012). По этим данным после учёта атмосферных нагрузок [9] были вычислены скорости станций. В табл. 1 и на рис. 2а приведены остаточные скорости станций после учёта вращения Евроазиатской плиты в системе ITRF2005 [3]. Скорости финских станций OLKI и TOUR (серая заливка в табл. 1), не входящие ни в одну из вышеперечисленных групп данных, были взяты из работы [7].

Поле деформаций моделировалось по скоростям станций с помощью пакета GRID_STRAIN [12] и представлено на рис. 26. Поле напряжений в очаговой зоне Осмуссаарского землетрясения 1976 года было построено с помощью программы Coulomb 3.1 [13 <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 аппаратурных параметрах были любезно предоставлены архивом Геофизической службы РАН.

Результаты обработки

Табл. 1.

Положения, период наблюдений и горизонтальные скорости исследуемых GPS-станций после исключения движения Евроазиатской плиты

Станции	Период (года)	Долготы	Широты	V_e (мм/год)	V_n (мм/год)
L EK0	2007- 2009	1 4.877	6 0.722	-0.10 ± 0.05	-0.66 ± 0.06
N OR0	2007- 2009	1 6.246	5 8.590	0.13 0.05	-0.78 0.05
M AR6	2007- 2011	1 7.258	6 0.595	0.74 0.03	-0.70 0.03
U PP0	2007- 2009	1 7.590	5 9.865	0.21 0.05	-1.02 0.04
V IS0	2007- 2011	1 8.367	5 7.654	0.56 0.03	-0.93 0.02
L OV0	2007- 2009	1 7.829	5 9.338	-0.19 0.05	-1.08 0.05
M ETS	2007- 2011	2 4.395	6 0.217	1.15 0.03	-0.63 0.03
S UR	2007- 2011	2 4.380	5 9.464	0.85 0.05	-1.19 0.05
K UR	2008- 2011	2 2.510	5 8.256	0.81 0.04	-0.99 0.03
L IEP	2006- 2009	2 1.006	5 6.511	-0.51 0.04	-1.09 0.03
V ENT	2006- 2010	2 1.548	5 7.391	0.30 0.03	-0.99 0.03
V AL0	2008- 2011	2 5.406	5 7.536	0.61 0.04	-1.17 0.04
R IGA	2007- 2011	2 4.059	5 6.949	0.24 0.03	-0.49 0.03
K ULD	2006- 2009	2 1.959	5 6.969	0.14 0.04	-0.77 0.03
O LKI	1999- 2008	2 1.473	6 1.240	0.92 0.04	-1.22 0.06
T UOR	1999- 2008	2 2.443	6 0.416	0.74 0.03	-1.31 0.05

На рис. 26 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 рис. 2б 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 различным типом 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 Рижский район находится под воздействием сдвиговых усилий.

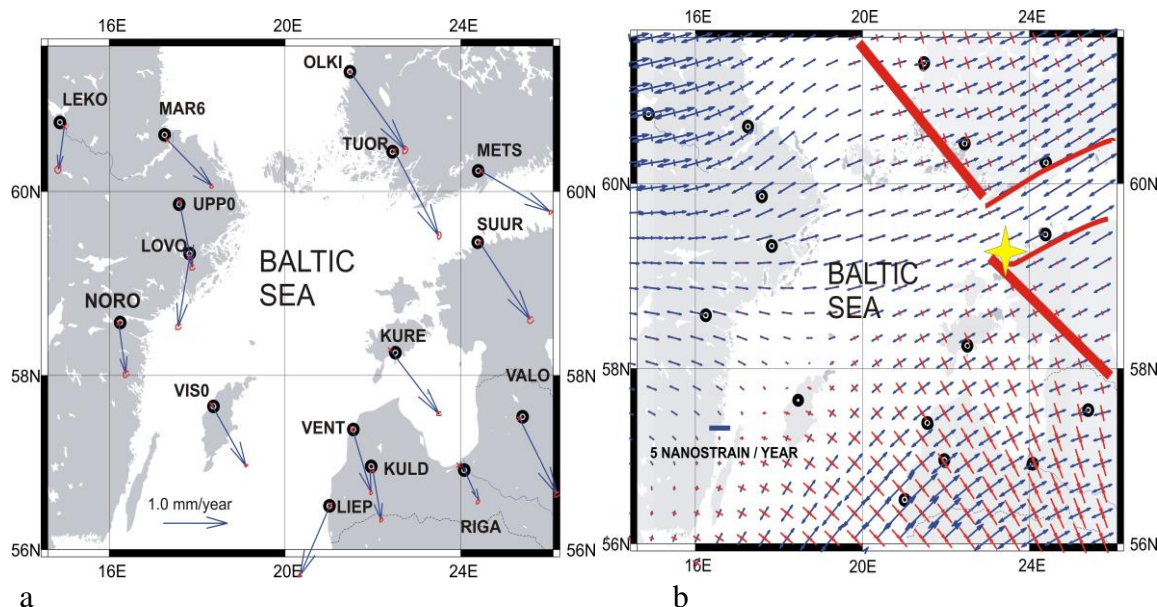


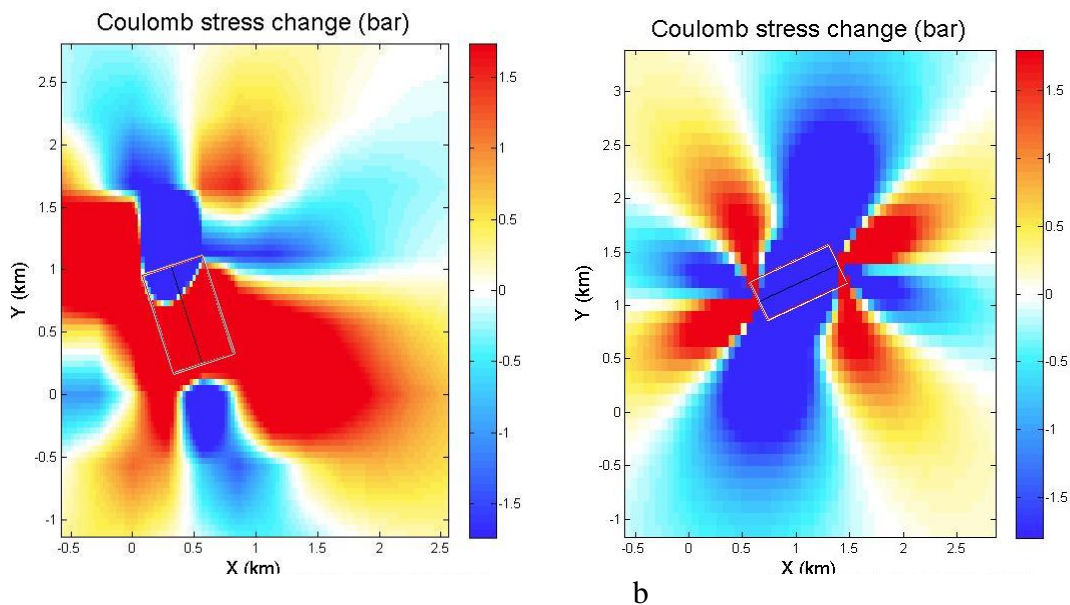
Рис. 2. а) Остаточные скорости движения GPS станций относительно Евразийской плиты (голубые стрелки) и их ошибки (красные кружки). Черными кружками обозначено положение станций GPS. б) Поле деформаций $\Delta L/L$; нанострейны/год, построенное с помощью таблицы 1 и программы [12]. Синие и красные стрелки – значения горизонтальных растяжения и сжатия соответственно. Поле деформаций вычислено по сетке 50×50 км. Красные жирные линии – предполагаемые активные разломы, желтая звезда – очаг Осмуссаарского землетрясения

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 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 тем 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 использовано авторами при оценке сейсмической опасности региона.

Еще один метод моделирования был использован для изучения поля напряжений района, а именно построение поля изменений напряжений Кулона в очаговой области. Для обоих вариантов разрыва в очаге, определяемым из механизма очага Осмуссаарского землетрясения, были построены карты 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, т.е. с направлением активного разлома. В случае Осмуссаарского землетрясения область положительных значений параметра возникает в случае первой плоскости разрыва, а именно

субмеридионального простираения. Размеры области достигают 3 км (рис.3а). Во втором случае (рис.3б) размеры области разрушения в плане малы, то есть зона разрушения, вероятно, имеет вертикальное простираение, 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 (рис.1).

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



a

b

Рис. 3. Карта изменения напряжения Кулона в очаге Осмуссаарского землетрясения 1976 года, построенная с помощью программы COULOMB 3.1 [13]

Механизм очага по [11]: а) плоскость I (простираение 162° , падение 69° , подвижка 17°) б) плоскость II (простираение 65° , падение 74° , подвижка -158°). См. рис. 1.

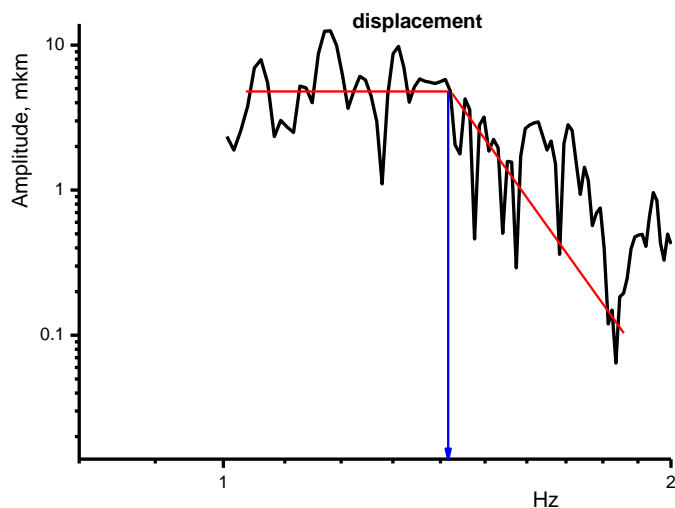


Рис.4 Амплитудный спектр смещений, сейсмическая станция Москва, сейсмограф СХ. Красной линией обозначены гладкая и наклонная части спектра. Синяя стрелка показывает значение угловой частоты

В последней части работы была предпринята попытка получить дополнительные данные об очаговых параметрах Осмуссаарского землетрясения 1976 года. С этой целью осуществлена оцифровка аналоговых сейсмограмм некоторых российских станций. Процесс получения цифровых данных, кроме собственно оцифровки включал в себя этапы масштабирования, сглаживания, введение поправок за аппаратуру (деконволюцию), построение амплитудных спектров в скоростях и смещениях движений [6]. На рис.4 приводится амплитудный спектр смещения записи землетрясения станцией Москва (сейсмограф СХ). Угловая частота f_c оказалась равной 1.4 Гц, а, следовательно, радиус очага:

$$R_{\text{очага}} = V_s * K_s / 2\pi * f_c [6]$$

Если $K_s = 2.34$ [4], то $R = 958$ м, при $K_s = 1.36$ [8], $R = 557$ м. Падение напряжения, рассчитанное по формуле $\Delta\sigma = 7 M_0 / (16 R^3)$ оказалось равным 1.7МПа и 8.9 МПа соответственно.

В табл. 2 сведены все имеющиеся данные об очаговых параметрах Осмуссаарского землетрясения 1976 года в сравнении с Калининградским 2004 года [2,5].

Табл. 2.

Сравнительные характеристики очаговых параметров

Землетрясение	Сейсмический момент $n*m$	Магнитуда	Падение напряжения, МПа	Радиус очага, м	Угловая частота, Гц
Осмуссаарское по (Slunga, 1979)	3.5×10^{15}	4.5 mb, 4.2 Mw	1.5	1000	3 (R. Slunga, устное сообщение)
То же, данная работа	3.5×10^{15}	то же	1.7 8.9	958 557	1.4
Калининградское (2)	7.2×10^{16}	5.2 Mw	37.4	945	1.1

Видно, что результаты данной работы в части оценок падения напряжения не отличаются от полученных в работе [11], 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 [8]. 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 среднем, все указанные параметры соответствуют мировым значениям (справочник).

Заключение

В данной работе были обработаны наблюдения стационарных GPS станций, расположенных в Финско-Ботнической области, в районе возникновения 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, на которой выявлены области с разными видами напряженно-деформированного состояния, при этом границы между ними можно рассматривать предположительно как активные на современном этапе разломы. Было установлено, что форма деформаций по GPS данным не противоречит решению механизма очага Осмусаарского землетрясения. Получены новые данные о таких параметрах, как угловая частота, размер очага и падение напряжения данного события, сделан вывод о более высоком энергетическом потенциале земной коры в Калининградском регионе. Результаты могут быть использованы при проведении работ по инженерным изысканиям.

Список литературы

1. Ананьин И.В., Булин Н.К., Клааманн Э.Р. Осмусаарское (Эстонское) землетрясение 25 октября 1976 г. // Землетрясения в СССР в 1976 г. 1980. М. С.91-97.
2. Ассиновская Б.А., Овсов М.К. Сейсмотектоническая позиция Калининградского землетрясения 21 сентября 2004 года. Физика Земли, 2008 № 9. Т. Р.32–43.
3. Altamimi, Z., Collilieux, X., Legrand, J., Garayt, B. and Boucher, C. ITRF2005: A new Release of the International Terrestrial Reference Frame based on Time Series of Station Positions and Earth Orientation Parameters. *J. Geophys. Res.*. 112, B09401. doi:10.1029/2007JB004949.
3. Assinovskaya, B., Shchukin, J., Gorshkov V. and Shcherbakova, N. On recent geodynamics of the Eastern Baltic Sea region. *Baltica* 2011.24 (2). P. 61-70.
4. Brune J.N. Tectonic Stress and spectra the of seismic shear waves from earthquakes *J. Geophys. Res.* 1970.V.75, P. 49997-5009.
5. Gregersen S., Wiejacz P., Debski W., Domanski B., Assinovskaya B., Guterch B., Mantyniemi P., Nikulin V.G., Pacesa., A., Puura V., Aronov A.G., Aronova T.I., Grunthal G., Husebye E.S., Sliampa S. (). The Exceptional Earthquakes in Kaliningrad District, Russia on September 21, 2004. *Physics Earth Planet. Inter.* 2007.V.164. №1–2. P. 63–74.
6. *IASPEI New Manual of Seismological Observatory Practice* / ed. P. Bormann. Potsdam: GeoForschungsZentrum, 2002. 1252 pp.
7. Lidberg M., J. M. Jonsson, H.-G. Scherneck and G.A.Milne. (2009). Recent results base on continuous GPS observations of the GIA process in Fennoscandia from BIFROST, *J.Geodyn.* (2010), doi:10.1016/j.jog. 2009.11.010.
8. Madariaga, R. Dynamics of an expanding circular fault. *Bull.Seism. Soc. Am.* 1976.V.66. p. 639-666.
9. Petrov L., Boy J.-P. Study of the atmospheric pressure loading signal in VLBI observations, *J. Geophys. Res.*, 2004.10.1029/2003JB002500, Vol. 109, No. B03405.
10. Precambrian basement of the Gulf of Finland and surrounding area, scale 1:1 000000. Geological Survey of Finland. Espoo. Koistenen T.(editor). 1994.
11. Slunga R. Source mechanism of a Baltic earthquake inferred from surface-wave recordings. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 69(6). 1979. P. 1931-1969.
12. Teza G, A. Pesci and A. Galgaro. Grid_strain and grid_strain3: Software packages for strain field computation in 2D and 3D environments, *Computers & Geosciences*, 2008. 34, 9. P. 1142-1153.
13. Toda, S., Stein S. R. and Richards-Dinger K., Bozkurt S. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer. *J. Geophys. Res.*. 2005.110.B05S16, doi:10.1029/2004JB003415.