# УДК 550.34+550.348.2 +551.24 Сейсмотектоническая позиция Калининградского землетрясения 21 сентября 2004 года

© 2007 Б.А. Ассиновская, М.К. Овсов

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, г. Санкт-Петербург e-mail <u>belaa@gao.spb.ru</u>

В данном исследовании представлена альтернативная непротиворечивая сейсмотектоническая модель сейсмического события Калининградского землетрясения 21 сентября 2004 года, согласно которой очаговые зоны двух наиболее сильных толчков оказались приуроченными к меридиональному разлому у западного берега Самбийского полуострова на территории Калининградской области Российской Федерации. Геодинамически осуществлялось левосдвиговое деформирование и разрушение локального участка земной коры между г. Янтарный и пос. Бакалино. Для построения модели была использована авторская методика структурного анализа гравимагнитных данных. С позиций макросейсмической шкалы EMS-98 осуществлены пересмотр исходных материалов и построение новой версии карт интенсивности сотрясений северо-запада Самбийского полуострова.

## ВВЕДЕНИЕ

Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 года с  $M_w \sim 5$  является прямым подтверждением представлений, лежащих в основе сейсмического районирования современного уровня [Уломов, 1999], о возможности повсеместного проявления слабых и даже умеренных сейсмических событий с редкой повторяемостью.

Некоторыми исследователями в Калининградской области выделялись даже прогнозные зоны вероятных очагов землетрясений с  $M_{\text{max}} \sim 6,0$  [Гарецкий и др., 1997, Рейснер, Рогожин, 2005]. Часть из них приурочена к Прегольской зоне разломов, а также нарушению северо-западного простирания в районе г. Зеленоградска. В окружающей акватории Балтийского моря потенциальных сейсмогенных зон обнаружено не было.

Калининградское землетрясение наряду с сейсмическими событиями 1904 года в грабене Осло и Оссмуссаарским 1976 года у берегов Эстонии оказалось наиболее сильным в Балтийском регионе за последние сто лет. Однако в отличие от южных районов Норвегии и Швеции, а также западной Эстонии, в последнее столетие в Калининградской области не отмечалось даже очень слабых землетрясений.

Землетрясение 21 сентября 2004 года состояло из ряда толчков, при этом сейсмическими станциями по техническим причинам зарегистрированы только три первых, из них наиболее сильными оказались первый в 1105 GMT (M<sub>W</sub> 5.0, mb 4.7, M<sub>L</sub> 4.8) и особенно второй в1332 GMT (*M<sub>W</sub>* 5.2, *mb* 4.8, *M<sub>L</sub>* 5.0) толчки. Первые два события изучены макросейсмически и инструментально настолько детально, насколько позволили объективные обстоятельства, однако никому из исследователей не удалось избежать противоречивости в полученных результатах, как в части локализации толчков, так и в определении сейсмотектонической позиции очаговой зоны. В работе [Gregersen, Wiejacz, Dębski et al., 2007], досконально анализирующей материалы регистрации событий сейсмическими станциями на региональных расстояниях, а также обобщающей все имеющиеся данные о локализации событий, в том числе телесейсмические, эпицентры двух наиболее сильных толчков помещены в центр Самбийского полуострова. Фиксированная глубина очагов составила 10 км. Некоторые другие источники определяют глубину очагов как 6-8 км [International..., 2001, Assinovskaya, Karpinsky, 2005]. В той же статье [Gregersen, Wiejacz, Dębski et al., 2007] описываются также механизмы очагов двух землетрясений, определенные по тензору момента центроида. Параметры механизмов оказались абсолютно идентичными и свидетельствуют о сдвиговых с небольшой сбросовой компонентой подвижках в очагах по двум возможным плоскостям разрыва - субширотной и субмеридиональной. В качестве основной выбрана первая плоскость, параллельная зоне Торнквиста-Тейссере (ТТЗ) – области сочленения Восточно-Европейской архейско-протерозойского возраста и фанерозойской Западно-Европейской платформ. Более детально сейсмотектоническое положение очагов не установлено. Кроме того, там же приводятся результаты обработки многочисленных макросейсмических материалов, собранных на региональных расстояниях в Балтийских странах, Польше, Швеции, Дании, Норвегии, России и др., которые в совокупности позволили составить макросейсмические карты событий, где довольно четко выделяются границы 3-, 4-, 5балльных (шкала EMS-98) зон, ориентированных в направлении северо-запад-юго-восток. Непосредственно в Калининградской области макросейсмические проявления изучены только на западе, а также на Куршской косе и южном побережье Куршского залива [Никонов, Аптикаев, Алешин и др., 2005, Aptikaev et al., 2005]. Карты интенсивности сотрясений в эпицентральной зоне построены с использованием шкалы MSK-64. Эпицентральная зона первого толчка, согласно этим данным, расположена на северозападе Самбийского полуострова с проявлениями интенсивности 5, 5.5 баллов повсеместно и 6 баллов практически исключительно в районе города Янтарный. При втором толчке интенсивность сотрясений на северо-западе полуострова оценена, в основном, как 5.5, 6 баллов MSK-64.

Согласно выводам работы [Никонов, 2006] макросейсмический эпицентр первого толчка находился на западе области, в Гданьском заливе у г. Янтарный, макросейсмический очаг второго события сформировался у северного берега Самбийского п-ва в районе пос. Приморский – г. Пионерский. Глубина очагов определена как 20 км. При этом первое землетрясение приурочено к субмеридиональному разлому, расположенному в море, к западу от полуострова, второе, последовавшее через 2.5 часа, связано с абсолютно другим, субширотным нарушением, протягивающимся вдоль северного берега Самбии. Соответственно, предлагаются разные механизмы возникновения толчков. Расстояние между эпицентрами составило в этом случае ~ 20 км.

Таким образом, положение очагов Калининградского землетрясения в плане по инструментальным определениям и по макросейсмическим данным существенно расходятся, что, вероятно, является необычным в современную эпоху интенсивного развития инструментальных наблюдений (рис. 1, 2). Очевидны определенные противоречия в определении сейсмотектонической позиции очаговых зон: модель, построенная по макросейсмическим данным, не согласуется с решениями механизмов очагов обоих толчков. Не возражая против позиции первого очага в работе [Никонов, 2006], тем более что она подтверждается макросейсмическими проявлениями в Гданьском заливе [Никонов, 2005], все же полагаем, что очаги при идентичных механизмах должны быть приурочены к одному и тому же тектоническому нарушению, вероятно, с простиранием СВ-ЮЗ. Активизация именно этого разлома сдвигового типа стала возможной вследствие его адекватного положения в региональном поле напряжений с СЗ-ЮВ направлением напряжения сжатия. Очаги всех землетрясений связаны с указанным нарушением, причем второй, наиболее сильный, находился севернее первого и был приурочен к области его пересечения с блокирующим широтным разломом, ограничивающим Северо-Самбийский блок с севера. Доказательства будем искать как путем дополнительного анализа макросейсмического поля Калининградского землетрясения, так и посредством доступных для анализа материалов по тектонике эпицентральной области и построением на их основе альтернативной модели возможного сейсмотектонического положения очаговых зон.



Рис. 1, 2

Фрагменты карт интенсивности сотрясений в баллах по шкале EMS-98 для первых двух толчков Калининградского землетрясения.

Символами обозначены эпицентры – макросейсмический [Никонов, 2005] черным косым крестом, инструментальные: EMSC – белым ромбом, MOS - белым шестиугольником, POL – белым прямоугольником, NEIS – белым треугольником, ISC\_AKI - белым пятиугольником, ISC\_DB – черным прямым крестом, наше решение - черной звездочкой

## МАКРОСЕЙСМИКА

На рис. 1, 2 представлены фрагменты макросейсмических карт эпицентральных зон 2-х основных толчков Калининградского землетрясения, построенные с использованием шкалы EMS-98 [Grünthal, 1998]. Предварительно весь доступный наблюдательный материал был пересмотрен согласно формализованным требованиям шкалы, при этом, по возможности, был проведен статистический анализ данных, с тем, чтобы исключить дробные, сложные (двойные, тройные), приблизительные (в скобках) оценки интенсивности. Шкала EMS-98, как известно, признает только целочисленные значения балльности. Значения интенсивности сотрясений при этом подходе кажутся более свободными от субъективных оценок.

Рассмотрение рис. 1 для первого события позволяет подчеркнуть как отмеченную в [Никонов, 2006] незавершенность изосейсты 6-го балла, так и северо-восточное простирание области распространения интенсивности 5 баллов, которая располагается на крайнем северо-западе Самбийского полуострова и далее в море. Площадь сухопутной части 5-балльной области ≈250 км<sup>2</sup>. Зона максимальной 6-балльной интенсивности в основном, располагалась в море и, следовательно, очаг землетрясения находился западнее г. Янтарный.

6-балльная зона второго толчка с локальными флуктуациями на некоторых участках западного и северного побережья Балтийского моря и ослаблениями в центре при наших новых построениях имеет то же простирание, что и 5-балльная зона первого землетрясения, т.е. ориентация эпицентральной зоны северо-северо-восточное, ортогональное упомянутому выше генеральному северо-западному направлению макросейсмического поля в целом. Зона, предположительно, имеет площадь 750 км<sup>2</sup>, из которых 250 км<sup>2</sup> находятся на суше. Параметры эллипса ощутимости 35 км  $\times$  27 км, (что соответствует обычному соотношению 3/4), средний радиус ~16 км. При данных построениях очаг второго события вполне мог располагаться севернее первого на расстоянии первых км от него.

Возникновение очагов именно в Гданьском заливе подтверждается дополнительно ранее неизвестными донесениями моряков, которые первыми оповестили властные структуры о землетрясении [http://www.regnum.ru/news/328785.html]. Их точное место-положение неизвестно, но вполне можно предположить, что они были ближе к источнику сотрясений, чем другие свидетели событий. Необычное явление, кроме того, наблюдалось на морском побережье. В море, примерно, в 1 км от берега местные жители увидели воронку, напоминающую торнадо [http://www.regnum.ru/news/331632.htm].

Можно указать еще и на то обстоятельство, что, например, на западном берегу Самбийского полуострова в г. Янтарный по свидетельству людей, проживающих на прибрежных улицах, оба толчка были очень жесткими, сугубо горизонтальными, направленными со стороны моря. Достаточно сказать, что в домах стекла окон, выходящие в сторону моря, во время обоих толчков оказались на мгновение вдавленными внутрь.

В работе [Никонов, 2005] также подробно описаны изменения водной среды и дна в районе г. Янтарный во время и после событий.

Усиление интенсивности на северном побережье Самбийского побережья, где по данным работы [Никонов, 2006] расположен второй очаг, при нашем подходе объясняется распространением воздействий исключительно в широтном направлении по простиранию разломов (рис. 4). Кроме того, северный берег отличается очень сложными неоднородными локальными инженерно-геологическими условиями: наличием многочисленных водоносных слоев, присутствием эоловых отложений (подвижных песковдюн), например, на мысу Гвардейский в районе г. Пионерский, рыхлых песков, например, в долинах рек Чистая и Светлогорка и др., перемежающихся повсеместно более плотными алевритами и суглинками, а также мореной [Географический..., 2002]. Присутствие контактов плотных и рыхлых отложений в основаниях домов, является причиной возникновения описанных в [Арtikaev et al., 2005] закручивающих эффектов, (М.А. Клячко, устное сообщение) имевших место при Калининградском землетрясении.

Для сравнения на рис. 1, 2 показаны также результаты локализации землетрясений инструментальными методами. Из всех имеющихся определений основных параметров двух толчков Калининградского землетрясения региональными сетями с удалениями от эпицентра 230 - 1500 км были выбраны наиболее надежные POL [Wiejacz and Debski, 2005], GS RAS [Габсатарова, Старовойт., Чепкунас, 2005], EMSC [http://www.emsc-csem.org]. Указанные решения, в общем, согласуются между собой: эпицентры обоих толчков во всех случаях располагаются в центре северо-западной части Самбийского полуострова на небольшом расстоянии друг от друга, но, что примечательно, за юговосточной границей зоны максимальных сотрясений или вблизи нее. Позиции очагов по телесейсмическим данным существенно отклоняются от эпицентров, определенных по более близким станциям.

По определениям NEIC [http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/] эпицентры обоих толчков находятся к югу от г. Янтарный, т.е. расположены на южном конце области максимальных сотрясений. Очаги землетрясений по ISC [http://www.isc.ac.uk] находят-

ся на востоке и юге потрясенных областей, на расстоянии 10 км друг от друга. Переопределение очаговых параметров с использованием скоростной модели AK-135, а не Джеффриса - Буллена, предпринятое в рамках модернизации методики локализации в ISC [http://www.isc.ac.uk/doc/analysis/2005p01/jb-ak\_explanation.html], не внесли радикальных изменений в положение очагов Калининградского землетрясения (рис. 1, 2).

Таким образом, налицо расхождение положения очагов, полученных разными методами. Этот факт естественно объяснить неточностью инструментальной локализации вследствие отсутствия близких к эпицентру сейсмических станций и, соответственно, записей прямых волн. Наличие резких региональных неоднородностей в земной коре препятствует получению уверенных решений по преломленным волнам с удалений 200 -1500 км. Очень сложные инженерно-геологические условия локально увеличивают интенсивность сотрясений на величину до 2-х баллов макросейсмической шкалы, тем самым вносят существенную погрешность в макросейсмические решения.

В связи с вышесказанным, интересно исследовать, какова же сходимость данных макросейсмической и инструментальной (разными методами) локализации слабых и умеренных по силе землетрясений в хорошо обеспеченных сейсмологическими наблюдениями странах.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМ *M* <sub>w</sub> ~ 5 ИЗ ДРУГИХ СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНОВ

Пользуясь возможностями сети Интернет, в рамках данного исследования было проведено сравнение между собой макросейсмических, локальных инструментальных, и телесейсмических ISC и NEIC доступных данных о некоторых землетрясениях Европы и Северной Америки. Выбирались события последних десятилетий, сравнимые по магнитуде ( $M_w$ ,  $M_L$  4.5-5) с Калининградским землетрясением. Таковых оказалось 10 событий из Швейцарии, США, Великобритании. В этих регионах имеются плотные локальные сети инструментальных сейсмических наблюдений, одновременно ведется постоянный сбор макросейсмических данных, в том числе, в реальном времени через сеть Интернет. Оказалось, что, например, 3 швейцарских землетрясения 1991 -1996 годов с Mw 4.3-4.6 H= 2-12 км локализованы с погрешностью ± 5 км, инструментальные (локальная сеть) эпицентры повсеместно находились внутри зон максимальной интенсивности, иногда отклоняясь от их центров (http://www.seismo.ethz.ch.). Для первых двух событий ISC и NEIC определения не противоречат решениям по данным локальной

сети, в третьем случае расхождение составило 12-13 км. Средний радиус изосейст 6-го балла, максимальных в двух случаях, составил 13-20 км.

В случае четырех британских землетрясений 1979 - 2002 годов с  $M_L$  4.7-5.4 с глубинами очагов 7-14 км инструментальные определения положения очагов по близким станциям также находятся в пределах зон максимальной интенсивности, однако телесейсмические позиции очагов сдвинуты на 10-16 км относительно макросейсмических и локальных данных (<u>http://www.earthquakes.bgs.ac.uk/macroseismics</u>.). Землетрясения проявили себя, главным образом, 5-6-балльными сотрясениями в эпицентре, средний радиус зоны 6 - 16-25 км.

Для трех землетрясений востока США 1996-2004 годов с магнитудами  $M_w$  = 4.2-4.6 и глубинами очагов 5 -18 км инструментальные эпицентры NEIC также, в основном, находятся внутри областей максимальной интенсивности, но сдвинуты относительно их центров (http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqarchives/poster/). Погрешности определений ISC находятся в диапазоне 5-17 км. Средний радиус зоны максимальной интенсивности составляет для американских землетрясений 11-15 км.

В качестве наглядного примера ниже приводится карта интенсивности сотрясений землетрясения 1990 года в Bishops Castle (Великобритания) (рис. 3).



Изосейсты землетрясения 2 апреля 1990 года в 13 46 43.2 UTC в Bishops Castle (Великобритания),  $M_L$ =5.1, H=14 км.

(http://www.earthquakes.bgs.ac.uk/macroseismics/bishopscastle\_macro.htm.

На рисунке звездочкой обозначен инструментальный эпицентр по данным национальной сети сейсмических станций. Видно, что эпицентр расположен внутри, практически в центре изосейсты 6-го балла, телесейсмический эпицентр, обозначенный на карте черной точкой, находится примерно, в 10 км к югу. Локации ISC и NEIC в данном случае практически совпадают.

Таким образом, полученный материал подтверждает, в общем, известный факт, что макросейсмические и инструментальные параметры землетрясений слабой и умеренной силы при наличии адекватно развернутых локальных сетей совпадают в пределах статистических ошибок их определения. Погрешности определений по телесейсмическим данным имеют систематический характер, обусловленный методикой локации и применяемыми для нее скоростными моделями. Тем не менее, практически для всех изученных землетрясений эпицентры NEIC и ISC находятся внутри изосейст максимального балла.

Представленный анализ мировых данных, во-первых, позволяет усомниться в правильности инструментальной локализации Калининградского землетрясения региональными станциями, во-вторых, ещё раз указать на неправомерность осреднения региональных и телесейсмических определений, так как последние во всех случаях содержат существенную систематическую погрешность.

## ТЕКТОНИКА

Задача определения тектонической позиции землетрясения представляется достаточно сложной и неоднозначной, вследствие неполной и однобокой геологической изученности региона, когда исследования проводились исключительно с целью поиска перспективных нефтегазоносных структур. О глубинном строении земной коры в целом северо-запада Самбии имеются только самые общие представления. Ближайший сейсмический профиль ГСЗ был отработан в 80-ти км к югу от эпицентральной зоны и пересекает Калининградскую область в юго-западном направлении [Чекунов и др., 1993]. Согласно этой модели на юге Калининградской области граница Мохо залегает на глубине 46 км, граничная скорость Vp = 8.1-8.2 км/сек; выше по разрезу исследователи выделяют промежуточную границу с Vp -7.1-7.2 км/сек. Мощность верхней коры составляет 14 -15 км при средней скорости в коре 6.3 км/сек. Для этой работы наиболее существенны данные по северо-западной части Литовского профиля EUROBRIDGE 95 [Eurobridge 95..., 2001], согласно которым в верхней коре на глубинах 10-12 км выделен волновод с понижением скорости с 6.3 до 6.15 км/сек. Известно, что волноводу субгоризонтальной трещиноватой зоне, заполненной минерализованными растворами - отводится решающая роль в современной геодинамике Фенноскандинавского региона и его обрамления [Глубинное ..., 2004].

В тектоническом отношении Калининградский регион находится на окраине Восточно-Европейской платформы в пределах юго-восточной части Западно-Литовского гранулитового массива между шовной зоной Тейссере – Торнквиста и Неманской системой активных разрывных дислокаций [Bogdanova, Bibikova, Gorbatschev, 1994]. Северо-западная ориентация двух указанных систем разломов определила характер макросейсмического поля на региональном уровне. Установлено, что архейско-протерозойский фундамент Калининградского блока и соседнего Гданьского прогиба весьма неоднороден по вещественному составу и возрасту слагающих его образований [Загородных, Довбня, Жамойда, 2001]. Согласно данным глубокого бурения меридиональная линия пос. Рыбачий – г. Правдинск разделяет архейские комплексы пород фундамента на западную и восточную зоны, различающиеся по степени метаморфизма и вещественному составу. Интрузивные образования нижнего протерозоя объединены в плагиогранитные, гранитные и габброидные комплексы, слагающие кольцевые структуры на крайнем северо-западе блока. Карельские габброидные интрузии прорывают породы ашваского гнейсово-сланцевого комплекса архея, установленного на юге структуры. В пределах Гданьского прогиба нижнерифейские интрузии гранитов рапакиви (?) рвут гранито-гнейсы бальнинканского комплекса нижнего протерозоя. Фундамент перекрыт осадочным чехлом, мощность которого увеличивается с востока на запад с 2.5 до 3 км.

Структура фундамента северо-западной части Калининградского (Самбийского) блока на суше и далее к западу в море представляет собой систему нескольких широтно-ориентированных относительно опущенных и приподнятых блоков, разбитых разломами северо-западного и меридионального направлений. Наиболее приподнятую позицию занимает Северо-Самбийский блок [Tectonic..., 2003, Загородных, Довбня, Жамойда, 2001]. На расстоянии нескольких км от берега исследователями выделена субмеридиональная разломная зона, маркирующая контакт архейских и нижнепротерозойских блоков фундамента (рис. 4). На суше с востока северо-западную часть Самбии обособляет разлом г. Пионерский – п. Грачевка, проникающий в осадочный чехол [Tectonic..., 2003].





Тектоническая схема северо-западной части Самбийского полуострова и прибрежной зоны по данным [Загородных, Довбня, Жамойда<sup>1</sup>, 2002 Tectonic map, ...2003, Блажчишин, 1974, Географический...2006, Орленок, 2001]. Условные обозначения: 1 - Нижний-верхний протерозой. Плагиомикроклиновые и микроклиновые граниты, гранитмигматиты. 2 – Нижний протерозой (Карелий). Бальниканский комплекс. Гранитогнейсы, мигматиты. Гнейсы силлиманит-кордерит-биотитовые. 3 – Архей. Ашвасский комплекс. Гнейсы плагиомикроклиновые, микроклиновые гранито-гнейсы, гранат-силлиманит-кордиеритовые кристаллические сланцы. 4 – Нижний рифей. Граниты рапакиви (?). 5 – Разломы межблоковые. 6 – то же, сбросы. 7 – разломы межблоковые. 8 – Предполагаемые разрывы четвертичного возраста, неотектонически активные линейные зоны. 9 – четвертичные палеодолины. 9 – изогипсы дочетвертичной поверхности, м.

В. Загородных, А. Довбня, В. Жамойда, устное сообщение

К востоку от него в районе мыса Таран и восточнее Р. Сувейдзис выделяет еще целый ряд нарушений широтного, субмеридионального, северо-западного направлений [Tectonic..., 2003].

Тектоническая структура северного прибрежья Самбии, как исходя из характера магнитного поля [Banka, Pharaoh, Williamson, 2002], так и в соответствии с опубликованными тектоническими построениями [Tectonic..., 2003], гораздо более простая.

#### НЕОТЕКТОНИКА

К настоящему времени собраны многочисленные свидетельства новейшей тектонической активности в Калининградском регионе. Однако, конкретные данные об активных разломах и их основных параметрах - морфологии, амплитудах смещений, скоростях движений и пр. пока не найдены.

Исследователи [Блажчишин, 1974, Додонов, 1971, Орленок, 2001, Географический ..., 2002] указывают на существование в изучаемой области как обширного поднятия с амплитудой 20-40 м по поверхности дочетвертичных отложений по палеогеновым и верхнемеловым отложениям, так и локальных опусканий этой поверхности ниже уровня моря (рис. 4). Указанное поднятие по поверхности дочетвертичных пород особенно на флангах деформировано многочисленными разрывами, так называемыми палеоврезами, абсолютные отметки которых находятся до -150 м ниже уровня моря (рис. 4). [Погребенные..., 1976]. Долины четвертичного возраста имеют, преимущественно, меридиональное и широтное направления, различную ширину и протяженность, они выявлены как на суше, (п. Приморье, г. Пионерский и др.), так и на море у берегов Самбийского полуострова. Направление большинства погребенных палеодолин отмечают линии более глубоких тектонических нарушений. В. Гуделис объясняет разницу в вертикальном положении отдельных отрезков той же самой долины поверхности дочетвертичных пород неотектоническими движениями, которые происходят, очевидно, вплоть до последнего времени [Геология..., 1976]. Можно заметить, что описанное выше поднятие дочетвертичной поверхности в плане частично совпадает с выделенной нами эпицентральной зоной, а Северо-Самбийский блок фундамента находится в области ее резкого наклона на север.

Исследователями установлены также многочисленные признаки молодых деформаций - зоны их смятия, ограниченные крутопадающими сбросами - и более глубоких горизонтов осадочного чехла. На западном и северо-западном подводных склонах Самбийского полуострова на расстояниях, примерно, 5 км и 7 -10 км от берега и на глубинах 15-20 м и 40 м, соответственно, осадочные породы формируют два подводных структурно-денудационных уступа [Блажчишин, 1974, Геология..., 1991]. К первому из них Р. Сувейдзис [Tectonic..., 2003] приурочил неотектонически активную зону. В плане указанная зона совпадает с меридионально ориентированным разломом в фундаменте, описанным выше (рис. 4). Следует отметить широкое распространение прочных кремнистых пород на подводном склоне у мыса Таран, что является прямым свидетельством существующего тектонического сжатия [Геология..., 1976].

В связи отсутствием данных о глубинном строении более детальные тектонические характеристики района были получены нами методами геофизического моделирования глубинного строения земной коры.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ

По современным представлениям сейсмический процесс обусловлен как особенностями геологической среды в целом, так и ее структурной организацией - разломами, контактами, границами структур и аномалий [Глубинное ..., 2004].

Для получения представлений о строении, по крайней мере, верхней части земной коры района предполагаемого положения очаговой зоны были использованы методы структурного анализа [Овсов, 2004] и вейвлет-преобразований [Штокаленко, Алексеев, 2007] доступных данных<sup>1</sup> о гравитационных и магнитных полях площадью ≈ 4000 км<sup>2</sup>. Работа была разделена на этапы. На первом этапе применялась методика структурного анализа всей совокупности данных.

Данная методика, базирующаяся на использовании корреляционного, кластерного, факторного и дисперсионного анализа, позволяет построить иерархическую (древовидную) структуру многомерных данных, которые характеризуются в точках наблюдения множеством количественных признаков. Основным приемом выявления структуры является исследование зависимости межкластерного расстояния от числа кластеров. При этом для деления выбирается исключительно старший по рангу скачок, который обеспечивает устойчивое выделение наименьшего числа самых общих, обширных кластеров. Структурный анализ признаков преобразовывает описания объектов из наблюдаемых признаков в пространство новых обобщенных признаков - классов. В новом признаковом пространстве осуществляется деление объектов на подмножества, которые относятся к делимому множеству как виды рода. Полученные видовые классы составляют структуру объекта на первом иерархическом уровне. Последующее деление видов как родов младшего уровня позволяет построить развитую многоуровневую структуру. Критерии качества структурного решения имеют двойственную оценку – статистическую и картографическую. В статистическом аспекте качеством полученной структуры является межгрупповая изменчивость исходных признаков в концевых клас-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> данные В.Загородных, В.Довбни, В.Жамойды, 2002

сах относительно общегрупповой изменчивости в корневом классе. Картографическую образную структуру изучаемого района, фрагмент карты классов- подмножеств однородных данных, можно видеть на рис. 5. Карта классов позволяет выявить образы, характерные для сложных погребенных геологических объектов.





Результат геофизического моделирования методом структурного анализа: фрагмент карты классов. Наиболее темный цвет на карте соответствует младшему иерархическому уровню 3 и наименьшему классу 1.

На карте приведены также эпицентры 1105 GMT и 1332 GMT (белые кружки), механизмы их очагов, направление регионального напряжения сжатия (большая белая стрелка) и направление движения (малые белые стрелки). Черными пунктирными линиями показаны грабенообразующие разломы и поперечные нарушения, черной сплошной линией обозначен сейсмогенный разлом. Тонкой черной линией обозначено положение разреза (рис. 6). Береговая линия показана белым цветом.

На втором этапе применена методика, названная авторами «вейвлет-преобразованиями с физическим смыслом» [Штокаленко, Алексеев, 2007]. Она базируется на интегральных преобразованиях физических полей и использует в качестве ядра функции, описывающие аномалию от элементарного источника преобразуемого поля. В результате было рассчитано распределение потенциальных полей с глубиной по профилю на широте 54.87° (рис. 5). На третьем этапе повторное применение методики структурного анализа к полученному разрезу позволило воспроизвести детальную картину строения верхней части земной коры (до глубины 8 км) в районе предполагаемой очаговой зоны (рис. 6). К сожалению, малый объем исходного материала не дал возможности распространить исследование на большие глубины и в восточном направлении.



Результаты анализа свидетельствуют как о горизонтальной, так вертикальной делимости, по крайней мере, верхних 8-ми км земной коры региона (рис. 5, 6). В разрезе отчетливо выделяются осадочный чехол и сложная блоковая поверхность фундамента. Можно видеть, что в верхах коры в 15-16 ти км от западного берега Самбийского полуострова существует линейная грабенообразная структура (рис. 6), восточный борт которой представляет собой сложную разломную зону сдвигового характера субмеридионального направления шириной до 10 км, (І на разрезе) пересеченную, протягивающимися с суши известными субширотными нарушениями сбросового типа - Северо-Самбийским и Лабско-Самбийским разломами [Канев, Лярская, 1992]. Зона сложно устроена – в ее разрезе выделяется целый ряд более мелких нарушений с плоскостями разрывов, падающих вертикально или наклонно на запад и на восток, а также большое количество изометрических структур – интрузивных тел основного состава (рис. 6). Вещественный состав этих образований фиксируется по признакам высоких намагниченности и плотности. Далее к берегу обнаружены еще два нарушения (II, III на рис. 6) параллельных зоне I, т.е. возможно, генетически образующих с ней единое целое. Эти дислокации представляет наибольший интерес, так как именно к ним приурочена неотектонически активная зона П. Сувейдзиса, описанная выше (рис. 4).

Первое из указанных нарушений меридионального простирания сдвигового типа расположено на расстоянии 7-ми (по фундаменту в 5 км) от Самбийского берега, причем деформация сдвигания реализуется в ее пределах не по вертикальной, а по наклонной плоскости. Разлом, кроме того, маркирует контакт двух разновозрастных разного вещественного состава блоков фундамента, причем блок A оказывается опущенным относительно блока B. Плоскость сместителя падает на восток под Самбийский блок. Угол падения плоскости разрыва меняется от 56 ° вблизи дна до 90° на глубине фундамента (3 км), в интервале глубин 4-7 км разлом снова выполаживается и вновь становится субвертикальным на глубине 8 км. В плане (рис. 5) Самбийский блок представляет собой монолитную округлую структуру 3-его и выше структурных уровней, возможно, интрузивной природы, гранитоидного состава. Западная граница блока не совпадает с береговой линией Самбийского полуострова, северная отмечает контакт Северо-Самбийского поднятия с Куршским прогибом. Вблизи береговой линии (на расстоянии 1 км от него) установлено еще одно меридионально направленное межблоковое нарушение с субвертикальным падением плоскости разрыва.

Очаг первого толчка вполне мог быть приурочен к тектоническому узлу – области пересечения широтного разлома, нарушающего Самбийский блок, вероятного разрыва северо-западного простирания, который маркируется Покровским врезом, с одним из выявленных в процессе структурного анализа субмеридиональных нарушений, рассекающих или ограничивающих Северо-Самбийский блок (рис. 5) со стороны моря. Учитывая специфику макросейсмических проявлений, этим разломом могло быть только наклонное нарушение II на рис. 5. Если принять глубину очага 8-10 км, то проекция гипоцентра первого события будет находиться в 3-х км к западу от Янтарного. Сравнивая морфологию нарушения II и данные по механизму очага, свидетельствующие о сдвиговой подвижке по вертикальной плоскости разрыва, следует предположить вероятность выпрямления сместителя с глубиной. С другой стороны, возможно, составляющая деформаций по падению несколько больше, чем это представлено в решении [Gregersen, Wiejacz, Dębski et al., 2007], а реализовавшийся тип механизма – сбросо (взбросо)сдвиг.

По [Gregersen, Wiejacz, Dębski et al., 2007] радиус очага составил около 1 км в случае обоих толчков. При ширине очаговой зоны ~0.5 км, ее длина будет составлять около 6-ти км, что, вероятно, соответствует расстоянию между первым и вторым гипоцентрами. Принимая во внимание однотипность решений механизма очага для обоих толчков, ориентацию макросейсмического поля (рис. 2), имеющееся распределение макросейсмической интенсивности, т.е. ее усиление на концах разлома, свойственную деформациям сдвигового типа, следует предположить, что очаг второго события располагался на том же тектоническом нарушении севернее первого. На карте классов это нарушение маркируется явно на участках к югу от Янтарного и к северу от Бакалино, но неотчетливо между этими пунктами. В геодинамическом отношении осуществлялось левостороннее сдвиговое деформирование и разрушение этого жесткого локального участка коры. Положение очага в плане, примерно, совпадает с центром области максимальных сотрясений (рис. 2). Учитывая наклон предполагаемого сейсмогенного нарушения, гипоцентр второго толчка также находился вблизи берега со стороны моря. Можно видеть также, что очаг второго толчка приурочен к тектоническому контакту, который маркируется на дочетвертичной поверхности градиентной зоной (рис. 4). Выше мы уже отмечали высокую плотность четвертичных деформаций в этом районе.

Не исключен вариант, однако, что второе землетрясение произошло на несколько большей глубине, чем 10 км, (неопределенность в определении этого параметра дает возможность сделать такое предположение), но ближе к первому, тогда его очаговая зона будет расположена непосредственно под Самбийским блоком северо-западнее (западнее) первого. В этом случае географические координаты толчков будут близки определениям NEIC, однако эпицентр второго толчка будет существенно отклоняться от центра зоны максимальных макросейсмических проявлений и нужно будет искать дополнительные объяснения описанному выше распределению интенсивности.

Таким образом, координаты первого толчка могут быть определены как 54.9 N 19.9 E, второй эпицентр расположен в 6-ти км севернее. Глубина очагов, предположительно, составила 8-15 км. Верхнее значение параметра получено нами в процессе локализации событий с использованием региональных станций [Assinovskaya, Karpinsky, 2005]. Нижнее значение глубинного положения очагов удалось установить по положению нижней границы (15 км) распространения хрупких деформаций, которое можно рассчитать по данным о тепловом потоке [Ассиновская, 2006].

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ-

Тип фокального механизма очага Калининградского землетрясения указывает на реализацию горизонтального сжатия, ориентируемого с северо-запада на юго-восток в соответствии с региональным полем напряжения. Как известно, основная часть Фенноскандинавского щита также находится в условиях доминирующего горизонтального сжатия СЗ-ЮВ. Указанное направление и тип деформаций подтверждается многочисленными определениями вида напряженного состояния прямыми методами [Reinecker et al., 2005]. Источником напряжений сжатия в этом районе принято считать расширяющийся Срединно-Атлантического хребет, северный сегмент которого близко подходит к изучаемому району. Механизм передачи напряжений связывают с наличием флюидосодержащего волновода в верхней коре, а в качестве мест реализации деформаций в пределах щита рассматривают ослабленные зоны. По другим представлениям источники современной геодинамической активности и повышенной сейсмичности в земной коре располагаются не только в пределах литосферы, где происходит перемещение плит и блоков, но и в более глубоких горизонтах мантии [Рундквист и др., 2001]. Как известно, в западной Европе выделяется протяженная Центрально-Европейская рифтовая система, которая включает целый ряд структур растяжения, например, Рейнские грабены, а также близко расположенный к Калининградскому региону грабен Осло. К формирующимся рифтовым системам, начало возникновения которых относится к первым сотням тысяч лет, принадлежит также Восточно-Балтийская, состоящая из рифтов тройного сочленения - Ботнического, Финского и Готландского [Гарецкий, 1999]. К Готландскому отрезку этой системы приурочено Калининградское землетрясение.

Существуют разные точки зрения на процессы современного рифтогенеза в Западной Европе. По одним представлениям они связаны, в основном, с движениями в коллизионном Альпийско-Гималайском поясе [Meyer and Foulger, 2007, www.mantleplumes.org], по другим обусловлены плюмтектоникой [Рундквист, 2001]. В любом случае мантийная конвекция в виде холодных и горячих мантийных потоков приводит к возникновению крупных неоднородностей в подлитосферной мантии. Движения в мантии повышают энергетику геодинамических процессов в земной коре, стимулируя сейсмический процесс.

Тепловая активность повсеместно отмечается в Калининградской области, особенно на севере Самбийского полуострова. Так, при макросейсмическом обследовании Калининградского землетрясения 21 сентября 2004 года удалось установить, что зимой 2002 года в пос. Лесной на Куршской косе в колодце появилась горячая вода [«Комсомольская правда». 2002, 1 марта], а в пос. Сосновка после событий 21 сентября шел пар из неглубокой скважины. Исследователи указывают также на местные проявления грязевого вулканизма на морском дне вблизи северного берега. Есть представления о том, что повышенный тепловой поток имеет мантийное происхождение [Гордиенко, 1993]. Весной 2007 года температура воды в Гданьском и Куршском заливах вновь резко повысилась, (В.В. Орленок, устное сообщение), что, по нашему мнению, могло быть предвестником землетрясения в 28 апреля 2007 года в Дуврском заливе с  $M_L$  4.2, H =2 км.

Следует добавить также, что детальные сейсмические исследования методами томографии все более подчеркивают определющее значение ослабленных зон древнего заложения, так, например, в южной части Рейнского грабена впервые показана ведущая роль варисцийских структур в сейсмогенезе [Lopes Cardozo and Granet, 2003], а в Скагерраке (Южная Норегия) установлена связь сейсмической активности с древней системой разломов Langust, которая ранее вообще не выделялась [Sorensen et al., 2006. <u>https:// bo-ra.uib.no/bitstream]</u>.

## выводы

В результате исследований построен новый вариант карты макросейсмического поля эпицентральной области Калининградского землетрясения с использованием шкалы EMS-98, что позволило установить подобие форм изосейст максимальной интенсивности двух наиболее сильных толчков. Это обстоятельство, а также сведения об идентичности механизмов очагов, определенных по инструментальным данным, свидетельствуют о возникновении событий, по крайней мере, в пределах одного тектонического нарушения вблизи западного берега Самбийского полустрова.

На основе собранных геолого-геофизических материалов с применением авторской методики структурного анализа построена сейсмотектоническая модель, которая не противоречит макросейсмическим и инструментальным данным. Определено положение гипоцентров двух основных толчков Калининградского землетрясения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ассиновская Б.А. О тепловой активности в очаговой зоне Калининградского землетрясения. // Известия ГАО. 2006. Вып. 218. С. 201-208.

Блажчишин А.И. Геологическое строение подводного берегового склона Самбийского полуострова. Региональная геология Прибалтики и Белоруссии / Рига: Зинанте. 1974. С. 161-168.

Габсатарова И.П., Старовойт О.Е., Чепкунас Л.С. Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 года. Строение, геодинамика и минерагенические процессы в литосфере / Сыктывкар: ГЕОПРИНТ. 2005. С. 58-60.

Гарецкий Р.Г., Айзберг Р.Е., Аронов А.Г., Карабанов А.К., Сафронов О.Н. Общее сейсмическое районирование Белорусско-Прибалтийского региона // Докл. НАН. 1997. Т. 41. № 4. С. 98-102. Гарецкий Р.Г. Осадочные бассейны древних платформ // Вестник ОГГГГН РАН, 1999. № 4(10). http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h\_dgggms/4-99/garetskiy.htm#begin.

Геология Балтийского моря / Под ред. Гуделиса В.К., Емельянова Е.М. Вильнюс: Моклас. 1976. 383 с.

Геология и геоморфология Балтийского моря. Сводная объяснительная записка к геологическим картам масштаба 1: 500 000. / Под ред. Григялиса А.А. Л.: Недра. 1991. 420 с.

Географический атлас Калининградской области / Под ред. Орленка В.В.. Калининград: Изд-во КГУ. ЦНИТ. 2002. 276 с.

Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления / Под ред. Шарова Н. В.. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2004. 353 с.

Гордиенко В.В. Тектоносфера Прибалтики // Геофизический журнал. 1993. Т. 15. № 5. С. 16-23.

Додонов А.Е. Дислокации кайнозойских отложений и их связь с неотектоникой на территории Калининградской области // Вест. МГУ. Сер. 4. Геология. 1971. № 6. С. 78-82.

Загородных В.В., Довбня А.В., Жамойда В.А. Стратиграфия Калининградского региона / Под ред. Харина Г. С.: Калининград. 2001. 225 с.

Канев С.В., Лярская Л.А. Девонские отложения акваториальной части Балтийской синеклизы / Палеонтология и стратиграфия фанерозоя Латвии и Балтийского моря. Рига: Зинанте. 1992. С. 159-173.

Никонов А.А. По следам Калининградского землетрясения // Природа. 2005. № 3. С. 47-53.

Никонов А.А., Аптикаев Ф.Ф., Алешин А.С., Ассиновская Б.А., Погребченко В.В. Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 года как модельное для Восточно-Европейской платформы // Геофизика XXI века: 2005. Доклады 7-х Чтений памяти В.В. Федынского (3-5 марта 2005). М.: Научный мир. 2006. С. 282-289.

Никонов А.А. О механизме очага Калининградского землетрясения 21 сентября 2004 года // ДАН. 2006. Т. 407. № 1. С. 102-105.

Овсов М.К. Классификационный структурный анализ геохимических и геофизических данных // Прикладная геохимия. Вып. 5. М.: ИМГРЭ. 2004. С. 135-143.

Орленок В.В. Сейсмоакустическая структура кайнозойских отложений подводного склона юго-востока Балтики. География на рубеже веков / Под ред. Орленка В. В. Калининград. 2001. С. 65-75.

Погребенные палеоврезы поверхности дочетвертичных пород Южной Прибалтики / Под ред. Гайгалиса А.И.. Вильнюс. Моклас. 1976. 140 с.

Рейснер Г.И., Рогожин Е.А. Калининградское землетрясение 2004 г. // Наука и технология в России. 2005. № 2-3. С. 10-14.

Рундквист Д.В, Гатинский Ю.Г., Буш В.А., Кособоков В.Г. Территория России в современной структуре Евразии: геодинамика и сейсмичность. // электронный научно-информационный журнал "ВЕСТНИК ОГГГГН РАН. 2001. № 3(18). http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h dgggms/3-2001/rundkquist.htm#begin.

Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации - ОСР-97. Масштаб 1:8000000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ. 1999. 57 с.

Чекунов А.В., Старостенко В.И., Красовский С.С., Кутас Р.И., Оровецкий Ю.П., Пашкевич И.К., Трипольский А.А., Елисеева С.В., Куприенко П.Я., Митрофанов Ф.П., Шаров Н.В., Загородный В.Г., Глазнев В.Н., Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И., Аксаментова Н.В., Гутерх А., Грабовска Т., Кобланьски А., Рыка В., Дадлез Р., Цвойдзински С., Корхонен Х., Луосто У., Гаал Г. Геотрансект ЕВРО-3 (ЕU-3) // Геофизический журнал. 1993. Т. 15. № 2. С. 3-31. Штокаленко М.Б., Алексеев С.Г. Вейвлет-преобразования с физическим смыслом // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 34-й сессии Междунар. науч. семинара им. Д.Г.Успенского. М.: ИФЗ РАН. 2007. С. 293-297.

Aptikaev F.F., Nikonov A.A., Alyoshin A.S., Assinovskaya B.A., Pogrebchenko V.V., Erteleva O.O. Kaliningrad earthquake of September 21, 2004, damage // International Conference on Earthquake Engineering, Skopje 2005. EE-21C. CD: Topic 1: Lessons from past earthquakes, 1-8.

Assinovskaya B. A., Karpinsky V.V. On September 21 2004 Kalinigrad earthquake source location / Joeleht A. (editor) // The Kalinigrad earthquake September 21, 2004 workshop materials. Institute of geol. Univers. of Tartu. Geol. Surv. of Estonia. 2005. P. 10.

Banka D., Pharaoh T.C., Williamson J.P. Potential field imaging of Palaeozoic orogenic structure in northern and central Europe. // Tectonophysics. 2002. V. 360. № 1-4. P. 23–45.

Bogdanova S.V., Bibikova E.V., Gorbatschev R. Palaeoproterozoic U–Pb zircon ages from Belorussia: new geodynamic implications for the East European Craton // Precam. Res. 1994. T. 68. № 1-4. P. 231–240.

EUROBRIDGE'95 seismic working group, Yliniemi J., Tiira T., Luosto U., Komminaho K., Giese R., Motuza G., Nasedkin V., Jacyna J., Seckus R., Grad M., Czuba W., Janik T., Guterch A., Lund C-E., Doodly J. J. EUROBRIDGE'95 deep seismic profiling within the East European Craton. // Tectonophysics. 2001.V. 339. № 1-2. P. 153-175.

Gregersen S., Wiejacz P., Dębski W., Domanski B., Assinovskaya B., Guterch B., Mäntyniemi P., Nikulin V.G., Pacesa A., Puura V., Aronov A.G., Aronova T.I., G. Grunthal, Husebye E.S., Sliaupa S. 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.

European Macroseismic Scale / G.Grünthal (editor). Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. 1998. V. 15. 99 pp.

Lopes Cardozo G. G. O. and Granet M. New insight in the tectonics of the southern Rhine Graben-Jura region using local earthquake seismology // Tectonics. 2003. V. 22. №. 6. P. 45-53.

Tectonic map of Lithuania. 1:500000 / P. Suveizdis (Editor). Inst. of geol. and geogr. Riga. 2003.

Reinecker, J., Heidbach, O., Tingay, M., Sperner, B. & Müller, B. The 2005 release of the World Stress Map. www.world-stress-map.org.

Wiejacz P. and Debski W. Kalinigrad earthquakes of September 21, 2004 / Joeleht A. (editor) // The Kalinigrad earthquake September 21, 2004 workshop materials. Institute of geol. Univers. of Tartu. Geol. Surv. of Estonia. 2005. P. 44-52.