

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ НА БАЛТИЙСКОМ ЩИТЕ **19.03.2016 МВ = 3,7**

О.А. Усольцева, Е.Г. Козловская

В работе проведено изучение параметров одного из сильнейших землетрясений на Балтийском щите за последнее время. Уточнены координаты землетрясения и глубина очага. Рассчитан фокальный механизм очага, соответствующий сдвиго-сбросовым деформациям вдоль крутопадающей разломной плоскости. На двух станциях идентифицирована вторая фаза Р волны. Исследованы свойства РmР волны на трассах эпицентр-регистрирующая станция.

Введение

19 марта 2016 года в северной части Ботнического залива произошло землетрясение (рис. 1) с магнитудой $M_b = 3,7$ (по данным международного центра данных в Вене). За последние 20 лет в районе, ограниченном координатами 63–67 с.ш., 20–24 в.д., выявлено только 2 землетрясения со сравнимой энергией: 15.06.2010 и 05.09.1996 гг. (сведения из ISC каталога). Согласно другому источнику (<http://www.oulu.fi/sgo-oty/quakes.html>), землетрясение 19.03.2016 г. считается самым крупным в Швеции за последние 100 лет, предыдущее крупное землетрясение на севере Ботнического залива зафиксировано 23.06.1882 г.

По данным литотектонической карты [Korja, Kosonen, 2015] район очага расположен на границе протерозойских пород, возраст которых менее $1,8 \cdot 10^9$ лет, и архейских пород, возраст которых 2,0– $1,8 \cdot 10^9$ лет. Согласно модели абсолютных скоростей поднятий земной поверхности NKG_RF03vel [Nørbech et al., 2008], скорость поднятия в гипоцентре близка к максимальной на Балтийском щите и

равна 9,5 мм/г. По данным GPS наблюдений деформации растяжения в этом районе имеют направления ЮЗ-СВ и ЮВ-СЗ.

В 1989 году в Ботническом заливе был проведен крупномасштабный эксперимент ГСЗ BABEL [Санина, 2003; Gohl, Pedersen, 1995]. Профили 2 и 3 этого эксперимента проходили рядом с изучаемым землетрясением. Для этих профилей в средней коре выявлена отражающая граница, погружающаяся в южном направлении. Для профиля 2 также отмечается разный характер сейсмических волн для двух граничащих геологических блоков: осадочно-вулканической центральной свекофенской провинции и вулканической северной свекофенской провинции.

Анализ современного этапа разгрузки напряжений на Балтийском щите интересен потому, что Фенноскандия считается недооцененной сейсмогенерирующей провинцией [Никонов, 2003]. К концу 90-х годов XX века в северной Фенноскандии были обнаружены геолого-геоморфологические признаки сильнейших землетрясений позднеледникового периода. Также было выявлено, что движущей силой сейсмогенеза является не только гляциоизостатическое выравнивание земной коры, но и процессы, формирующие тектонические структуры земной коры.

В настоящей работе определены параметры гипоцентра землетрясения 19.03.2016 г., изучен фокальный механизм очага и выполнен анализ вторичных фаз на основе записей только постоянных сейсмических станций, расположенных на региональных расстояниях. Исследование фокального механизма большой для данного района магнитуды события до сих пор не проводилось.

Данные

Карта расположения используемых в работе широкополосных трехкомпонентных сейсмических станций представлена на рис. 1. Сейсмограммы пяти станций OLKF, KLF, OUL, MSF, RNF с частотой оцифровки 100 Гц предоставлены Соданкульской Геофизической обсерваторией. Сейсмограммы станций SJUU, KEV, MEF, RAF, HEF, SUF, VAF, LANU, SGF с частотой оцифровки 100, 50 и 20 Гц получены с сайта www.orfeus-eu.org/eida/. Времена пробега Р и S волн для 8 станций KALU, ODEU, LILU, HARU, SVAU, UMAU, PAJU, BREU предоставлены шведским бюллетенем (<http://snsn.geofys.uu.se/>). Данные для группы ARCES получены на сайте NORSAR (<http://www.norsardata.no/>).

При определении параметров гипоцентра, расчете фокального механизма и синтетических сейсмограмм используется одномерная модель по профилю HUKKA из [Janik et al., 2009], которая представлена в таблице 1 и соответствует северной части Балтийского щита. Выбрана именно эта модель по причине того, что большинство рассматриваемых станций расположено на севере (рис. 1). Модель состоит из 6 слоев в коре и 2 в верхней мантии. Самый верхний слой имеет толщину 1,3 км, остальные более 3 км.

Параметры эпицентра и фокальный механизм очага

Координаты эпицентра и глубина очага рассчитаны по измерениям Р волны на 23 станциях и S волны на 5 станциях с использованием скоростной модели для Северной Фенноскандии (табл. 1) и программы HYPOELLIPS [Lahr, 1989].

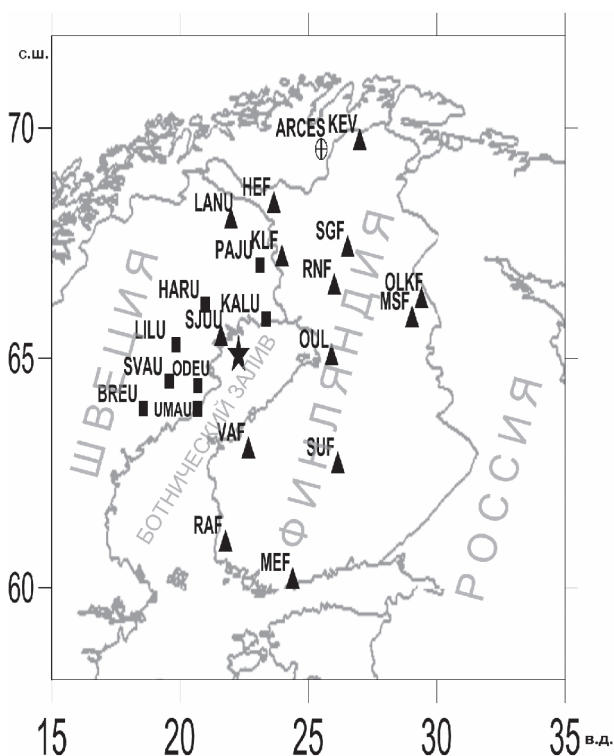


Рис. 1. Карта местоположения эпицентра землетрясения (звездочка), 8 шведских станций (квадраты), 14 шведских и финских станций (треугольники) с известными волновыми формами, сейсмической группы ARCES (кружок с крестом внутри)

Одномерная скоростная модель для Северной Фенноскандии
в коре и верхней мантии [Janik et al., 2009]

Таблица 1.

	Верхняя кора		Средняя кора	Нижняя кора		Верхняя мантия	
Глубина, (км)	0,0–1,3	1,3–18,0	18–37	37–40	40–44	44–50	более 50
V_p , (км/с)	6,2	6,3	6,6	7,15	7,4	8,03	8,4

Как видно из рис. 1, азимутальное распределение станций для данного события достаточно равномерное, максимальный угол между направлениями на две соседние станции равен 57° . Финальная среднеквадратичная невязка по всем используемым данным составляет 0,18 с. Сравнение наших параметров эпицентра с данными других агентств (табл. 2) показывает, что расхождение по координатам достигает 11, а по глубине 2 км. Вычисленная для имеющихся данных ошибка положения эпицентра составляет 1 км в горизонтальном и 1,5 км вертикальном направлениях для 68% доверительного интервала с учетом точности определения времени вступления волн.

Таблица 2

Сведения о параметрах эпицентра для события 19.03.2016 21:55, предоставленные бюллетенями шведским (UPP), норвежским (Norsar), международным центром данных в Вене (IDC, информация с сайта www.isc.ac.uk) и полученные авторами работы. N с $\Delta < 600$ км – количество станций или сейсмических групп, используемых при локации, на эпицентральных расстояниях менее 600 км

T0 (с)	Сев. шир (гр.)	Вост. долг. (гр.)	Глубина (км)	N с $\Delta < 600$ км	Источник
30,6	65,043	22,556	16,7	9	UPP
29,0	65,09	22,49	-	3	Norsar
27,65	65,071	22,286	-	-	IDC
31,5	65,061	22,521	18,7	23	Данная работа

Таблица 3

Сведения о механизме очага

1-ая нодальная плоскость Strike/dip/rake (°)	37/81/-156
Погрешность определения 1-ой нодальной плоскости (°)	24
2-ая нодальная плоскость Strike/dip/rake (°)	303/66/-10
Погрешность определения 2-ой нодальной плоскости (°)	33
Ось растяжения T az/pl (°)	168/10
Ось сжатия P az/pl (°)	262/23

Расчет фокального механизма проведен по программе HASH [Hardebeck and Shearer, 2008] с использованием полярностей первых вступлений Р волны и скоростной модели из табл. 1. Используемый набор данных состоит из 17 первых вступлений. Для точечного источника применялась модель очага в виде двойной пары сил. Как известно, для такой модели нодальные плоскости (поверхности нулевых смещений) характеризуются простиранием (strike), углом падения (dip) и направлением смещения по разлому – углом (rake) между простиранием и вектором подвижки. В программе HASH выполняется сеточный поиск между всеми возможными значениями strike, dip и rake углов для заданных азимутов от источника к приемнику и скоростной модели, которая определяет углы выхода луча. Рассчитанные углы выхода для имеющегося набора данных варьируются от 78 до 138°. Результаты расчетов представлены в табл. 3 и на рис. 2. Оси напряжений характеризуются азимутом (AZ) и углом их погружения относительно горизонта (PL).

Выявлены 2 возможных варианта расположения разлома: ССВ-ЮЮЗ или СЗЗ-ЮВВ. Тип механизма очага: сдвиго-сбросовый вдоль крутопадающей разломной плоскости.

Амплитудный анализ первых Р фаз для различных станций показал, что на станции VAF амплитуда первого вступления Р волны превосходит уровень шума в 30 раз, на OLKF – в 16, LANU – в 83, OUL – в 254 раза. Амплитудные отношения S фазы к Р фазе имеют резкие различия между станциями, расположенными на юге и севере. Для VAF оно равно 140, а для OUL и LANU около 2. Разный характер амплитуд Р и S волн на севере и на юге может быть связан как со свойствами пород под станцией, так и с фокальным механизмом очага.

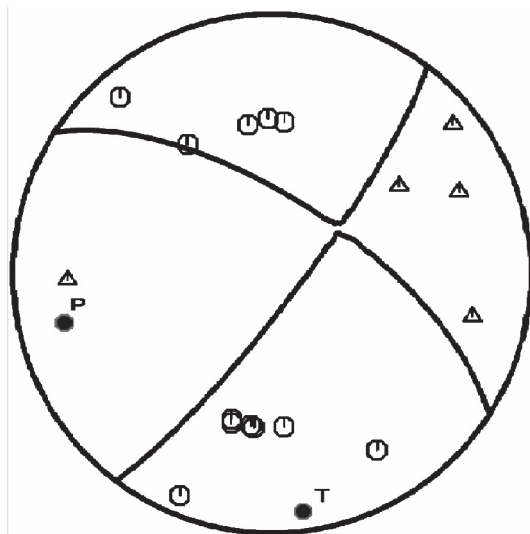


Рис. 2. Стереограмма механизма очага в проекции нижней полусферы. Черный восьмиугольник с буквой Т обозначает ось напряжения растяжения, с буквой Р – ось напряжения сжатия. Белые восьмиугольники обозначают станции с наблюдаемыми волнами сжатия, треугольники обозначают станции с наблюдаемыми волнами разряжения

Вторичные вступления Р волн

Анализ вторичных фаз проведен на основе сравнения реальных сейсмограмм с синтетическими сейсмограммами и теоретическими редуцированными годографами прямой, преломленной на границе в верхней мантии и отраженных волн (рисунки 3 и 4). Синтетические сейсмограммы построены с использованием подхода Каньяра и де Хоопа [Аки, Ричардс, 1983] и учетом механизма очага с помощью пакета программ «Компьютерные программы в сейсмологии» [Herrmann, 2013]. По оси ординат на рисунках 3, 4 отложено редуцированное время пробега с редукцией на 8 км/с, что соответствует скорости под поверхностью Мохо на глубине 44 км в модели [Janik et al., 2009] (табл. 1). Такая редукция часто применяется в работах, посвященных Фенноскандии, например, в [Yliniemi et al., 2004] и является эффективной при анализе вторичных фаз на расстояниях 50–1000 км. Теоретический годограф преломленной волны имеет кажущуюся скорость 8,4 км/с (для прямой волны кажущаяся скорость равна 6,6 км/с). Как видно из рисунков 3, 4, годографы отраженных волн на данных расстояниях близки к прямолинейным с кажущимися скоростями в диапазоне 6,7–7,1 км/с.

Согласно теоретическим расчетам (рис. 3, нижний прямоугольник) для представленного двадцатисекундного временного интервала при 200 км $<\Delta < 380$ км максимум выделившейся сейсмической энергии чаще всего соответствует времени прихода отраженных волн: РmР и других. Мы оценили отношение глобального максимума огибающей на рассматриваемом двадцатисекундном интервале к локальному максимуму, соответствующему первому вступлению. Обозначим это отношение Мг/Мл. Результаты измерений представлены в табл. 4.

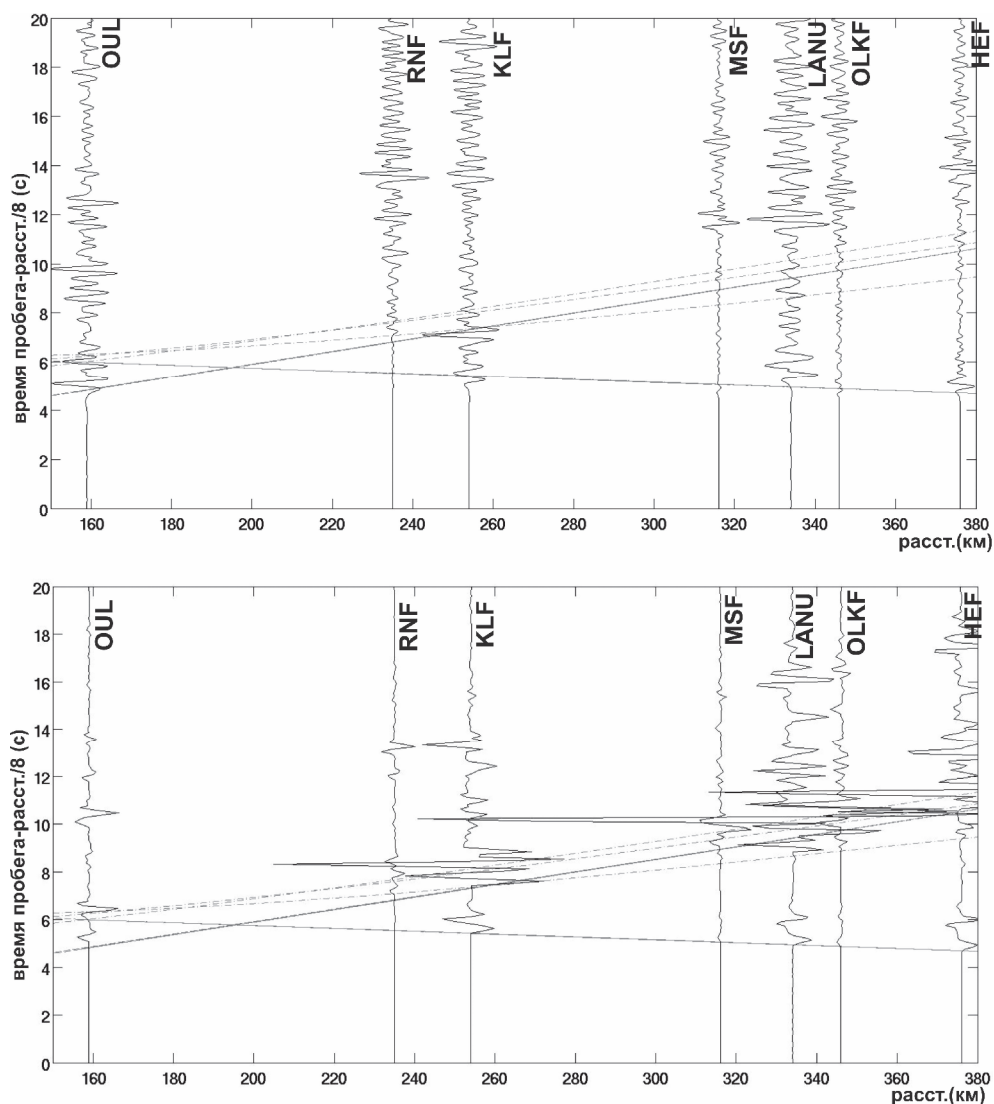


Рис. 3. Монтаж реальных (верхний прямоугольник) и синтетических (нижний прямоугольник) сейсмограмм (вертикальная компонента) для станций, расположенных в северной части Балтийского щита. Сейсмограммы масштабированы на максимальную амплитуду на всей записи. Сплошные прямые линии – годографы прямой и преломленной на границе в верхней мантии волн, пунктирные линии – годографы отраженных волн для модели из табл. 1.

Для реальных сейсмограмм проведена полосовая фильтрация 1–3 Гц

Для северной части Балтийского щита на реальных сейсмограммах амплитуда колебаний возрастает незначительно, после первого вступления (рис. 3). Экспериментальное значение Мг/Мл всегда ниже теоретического (табл. 4). Увеличение амплитуды на реальных записях наблюдается на ~1 секунду позже, чем теоретически рассчитанное время прихода отраженных волн. Построение вспаграмм

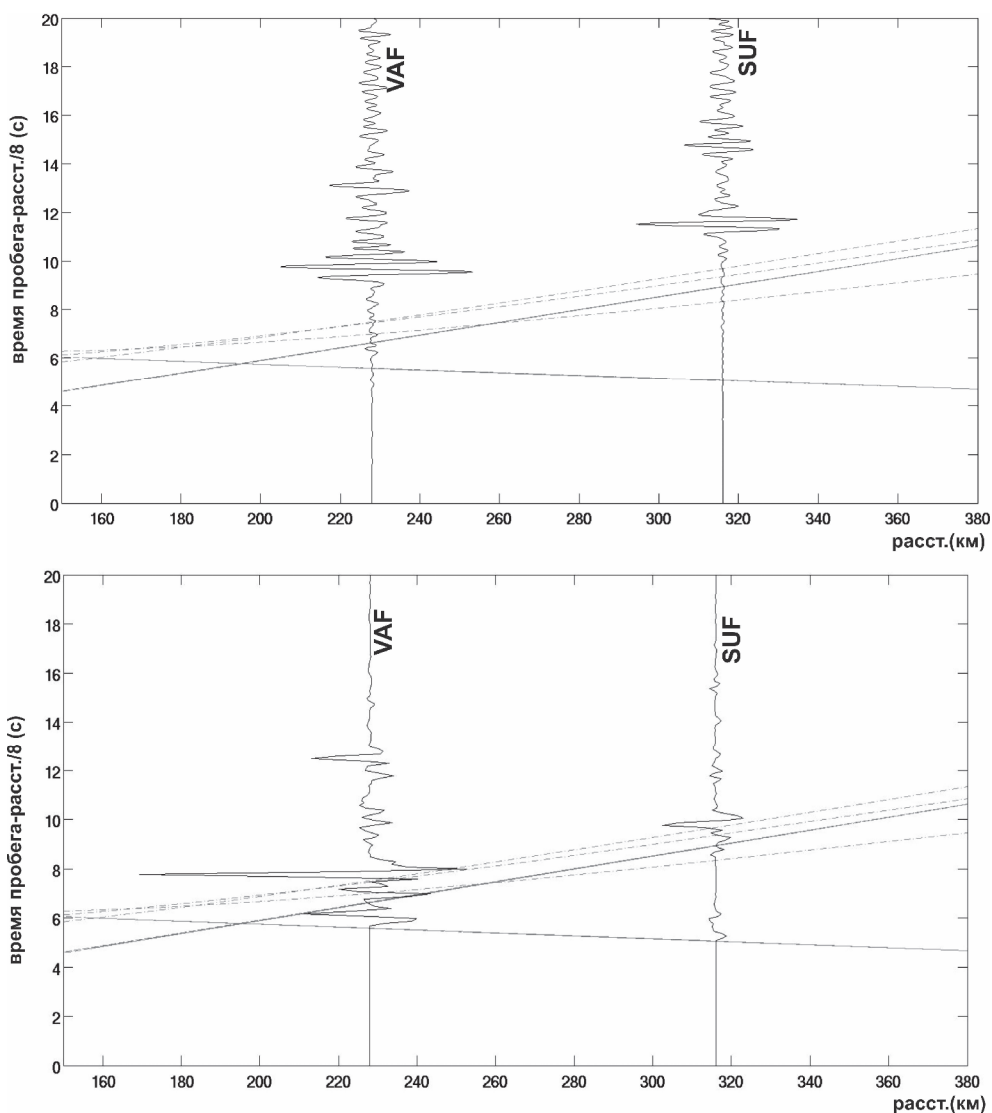


Рис. 4. Монтаж реальных (верхний прямоугольник) и синтетических (нижний прямоугольник) сейсмограмм (вертикальная компонента) для станций, расположенных в южной части Балтийского щита. Остальное описание, как и для рис. 3

для сейсмической группы ARCESS ($\Delta = 513$ км) показывает, что существует вступление с кажущейся скоростью 7,0 км/с через 13 сек после первого вступления, которое возможно связано с отраженной волной. Согласно теоретическим расчетам для $\Delta = 513$ км максимальная разница между преломленной Р волной и отраженной равна 11 сек. На реальных сейсмограммах станций, расположенных в южной части Балтийского щита (рис. 4), четкие максимумы сейсмической энергии присутствуют, экспериментальное Мг/Мл всегда больше теоретического в 3–10 раз (табл. 4), что связано со свойствами отражающей границы и со слабым

Таблица 4.

Отношение (Мг/Мл) глобального максимума огибающей к локальному максимуму, соответствующему первому вступлению, для $\Delta/8 < t < \Delta/8 + 20$ (t – время пробега), полученные по синтетическим и реальным сейсмограммам. Для реальных сейсмограмм проведена полосовая фильтрация 1–3 Гц

	Северная часть Балтийского щита (БЩ)				Южная часть БЩ	
Код станции Эпиц. Расст.	MSF $\Delta = 316$ км	LANU $\Delta = 334$ км	OLKF $\Delta = 346$ км	HEF $\Delta = 376$ км	VAF $\Delta = 228$ км	SUF $\Delta = 316$ км
Теория	15	17	28	23	20	5
Эксперимент	9	2	5	1,4	71	52

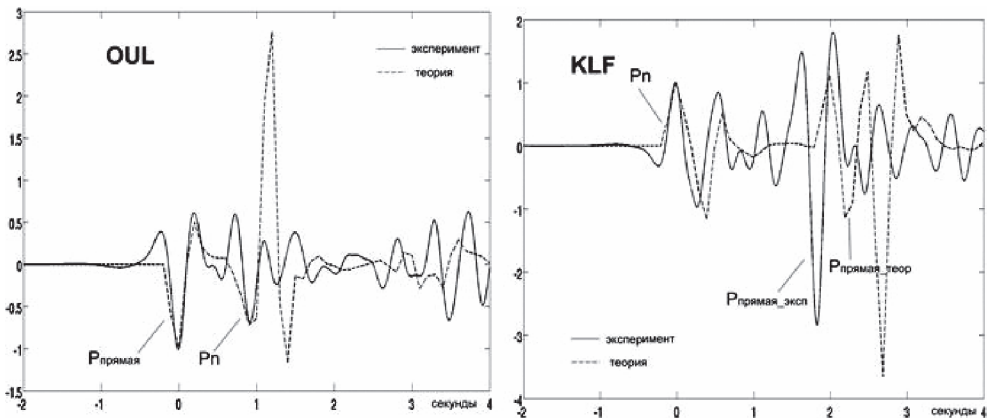


Рис. 5. Сравнение реальных и синтетических сейсмограмм для станций OUL и KLF с целью идентификации прямой $P_{\text{прямая}}$ и преломленной P_n волн. Сейсмограммы масштабированы на амплитуду первого вступления и выровнены по времени прихода первого максимума.

Для реальных сейсмограмм проведена полосовая фильтрация 1–3 Гц

первым вступлением. Оценка кажущейся скорости по VAF и SUF дает значение 6,7 км/с, что соответствует нижней границе диапазона кажущихся скоростей отраженных волн для модели из табл. 1. Для станции VAF экспериментальное время вступления возможной отраженной волны на 2,0 сек позже теоретического, а для SUF – на 1,8 сек.

Согласно лучевой теории для землетрясения с глубиной очага 18,6 км на эпицентральных расстояниях $\Delta < 200$ км минимальное время пробега соответствует прямой волне, а для больших Δ минимальное время соответствует волне, преломленной на границе кора-мантия P_n . Для станции OUL и на реальных, и на синтетических сейсмограммах мы видим вступление первой прямой P волны, а затем через 1 сек колебания, связанные с преломленной P_n волной (рисунки 3, 5), и амплитудой на 20% меньшей, чем амплитуда первого вступления. Для станции KLF временной интервал между первой и второй фазами равен 1,7 сек на реальной сейсмограмме и 2,0 сек на теоретической (рис. 5), амплитуда второй фазы в ~2,5 раза больше по экспериментальным данным, чем по теоретическим.

Выводы

Рассчитанные в работе координаты и глубина очага более надежны, чем предыдущие варианты, из-за использования большего количества станций на региональных расстояниях (табл. 2). Станции KLF (251 км от источника) и OLKF (346 км от источника) для анализа данного события используются впервые. Глубина очага соответствует средней коре, подошве гранитно-метаморфического слоя.

Возможное преобладание сдвиговой составляющей над сбросовой в очаге нетипичны для послеледниковых разломов. С другой стороны, согласно [Steffen et al., 2014] большая крутизна плоскости разлома, полученная в данной работе, свидетельствует о реактивации разлома в период гляциоизостатического выравнивания. Вероятно, как уже было замечено, сейсмогенез на исследуемой территории связан не только с гляциоизостатическим выравниванием, но и с процессами тектогенеза. Рассчитанное направление разлома в первом приближении совпадает с направлением деформации растяжения по данным GPS. Исследование фокального механизма для данного события ранее не проводилось, несмотря на то, что механизм очага землетрясения является одним из важнейших параметров, характеризующих сейсмическое событие.

Выявленный в работе несхожий с теоретическим характер отраженной PmP волны возможно связан со свойствами границы Мохо в исследуемом регионе. Задержка времени вступления отраженных волн на рис. 4 вверху может быть объяснена увеличенной мощностью коры на юге (более 50 км). Результаты эксперимента SVEKALAPKO [Санина, 2003], проводимого в южной Финляндии, подтверждают наличие зоны более глубокого, чем в модели [Janik et al., 2009], залегания границы кора-мантия.

Работа выполнена в рамках госзадания по теме «Создание сейсмологической модели литосферы и глубинного строения древних щитов» (№ 0146-2014-0003).

Литература

- Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы. М.: Мир, 1983. 360 с.
- Никонов А.А. Фенноскандия – недооцененная сейсмогенерирующая провинция / Геофизика XXI столетия: 2002 год: Сборник трудов Четвертых геофизических чтений имени В.В. Федынского. М., 2003.
- Санина И.А. Метод и результаты исследования литосферы: дисс. на соиск. уч. ст. докт. ф.-м. наук. М.: ИДГ РАН, 2003.
- Janik T., E. Kozlovskaya, P. Heikkinen, J. Yliniemi, and H. Silvennoinen. (2009). Evidence for preservation of crustal root beneath the Proterozoic Lapland-Kola orogen (northern Fennoscandian shield) derived from P and S wave velocity models of POLAR and HUKKA wide-angle reflection and refraction profiles and FIRE4 reflection transect // J. Geophys. Res., 114, B06308, doi:10.1029/2008JB005689.
- Hardebeck J.L., Shearer P.M. HASH: A FORTRAN Program for Computing Earthquake First-Motion Focal Mechanisms. 2008. V. 1,2. 31 January, 17 p.
<http://quake.wr.usgs.gov/research/software/#HASH>, 2008
- Herrmann, R.B. (2013) Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research // Seism. Res. Lettr. 84, p. 1081-1088, doi:10.1785/0220110096, <http://www.eas.slu.edu/eqc/eqccps.html>
- Gohl K., Pedersen L.B., Collisional tectonics of the Baltic Shield in the northern Gulf of Bothnia from seismic data of the BABEL project // G.J. Int. 1995. V. 120. P. 209-226.

Korja, A., Kosonen, E. (Eds): Seismotectonic framework and seismic source area models in Fennoscandia, northern Europe // Report S-63. Institute of Seismology, University of Helsinki, 2015. 285 p.

Lahr, J.C. HYPOELLIPSE/Version 2.0: A computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude, and first motion pattern // US Geological Survey Open-File Report. 1989. 89-116, 92 p.

Nørbech T., Engsager K., Jivall L., Knudsen O., Koivula H., Lidberg M., Ollikainen M., Weber M. Transformation from a common Nordic reference frame to ETRS89 in Denmark, Finland, Norway, and Sweden – status report / Knudsen P. (Ed.) // Proc. of the NKG General Assembly, May 29–June 2, Copenhagen, Denmark, 2006/ Techn. Report № 1, 2008. DTU Space National Space Institute.

Steffen R., Steffen H., Wu P., Eaton D.W. Stress and fault parameters affecting fault slip magnitude and activation time during a glacial cycle // *Tectonics*. 2014. V. 33. P. 1461–1476.

Yliniemi J., Kozlovskaya E., Hjelt S.-E., Komminaho K., Ushakov A. and SVEKALAPKO Seismic Tomography Working Group. Structure of the crust and uppermost mantle beneath southern Finland revealed by analysis of local events registered by the SVEKALAPKO seismic array // *Tectonophysics*. 2004. V. 394, I. 1–2, 2 December 2004. P. 41–67.