

УДК 550.340

ГОДОГРАФЫ РЕГИОНАЛЬНЫХ ВОЛН P И S ДЛЯ РАЙОНОВ СПРЕДИНГОВЫХ ХРЕБТОВ ЕВРО-АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА

© 2017 г. А. Н. Морозов^{1,2,*}, Н. В. Ваганова¹

¹Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики РАН
163000 Архангельск, ул. Набережная Северной Двины, 23

²Сектор сейсмического мониторинга севера Русской плиты Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы РАН

163000 Архангельск, ул. Набережная Северной Двины, 23

*e-mail: morozovalexey@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.07.2015 г.

С использованием методологии приемных функций обменных волн (P-receiver functions) была определена структура земной коры и верхней мантии в пределах двух участков Евро-Арктического региона — архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа. Это позволило вычислить два годографа региональных сейсмических волн P и S — NOES и Sval. Проверка эффективности этих годографов, при их сравнении с годографами IASPEI91, BARENTS и BARENTS3D, показала, что оптимальным для определения координат эпицентров землетрясений в районе спрединговых хребтов Евро-Арктического региона является годограф NOES.

DOI: 10.7868/S0203030617020055

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных процедур обработки сейсмологических данных является определение местоположения эпицентров землетрясений. От корректной ее реализации существенно зависит качество решения различных задач в сейсмологии. Для приблизительной оценки координат эпицентров землетрясений на локальном и региональном уровнях могут использоваться глобальные годографы JB [Jeffreys, Bullen, 1940], PREM [Dziewonski, Anderson, 1981], IASPEI91 [Kennett, Engdahl, 1991] или АК135 [Kennett et al., 1995]. Они в усредненном виде определяют кинематику региональных фаз в масштабе всего земного шара. Однако получаемые при этом значения кинематических характеристик сейсмических фаз и координат эпицентров имеют большую погрешность. Из-за этого снижается их научная значимость.

Причиной таких погрешностей является то, что на территории, где эпицентры расположены на небольших расстояниях (до 20°), большую роль играют региональные геологические особенности. Поэтому при сейсмологических исследованиях конкретных регионов создаются и используются собственные годографы. Например, в сейсмологическом агентстве NORSTAR для районов Фенноскандии и прилегающих шельфовых территорий используется модель BARENTS

[Kremenetskaya et al., 2001] и ее производные модификации BAREY и BAREZ [Hicks et al., 2004]. Для локации землетрясений на севере Восточно-Европейской платформы авторами ранее был вычислен годограф NORP (North of the Russian Plate) [Морозов, Ваганова, 2011].

На рис. 1 показаны эпицентры землетрясений, произошедших в пределах хребта Гаккеля за период с 2011 по 2014 гг., и зарегистрированы станциями Архангельской сейсмической сети и станциями, функционирующими на архипелаге Шпицберген (SPA0, KBS, HOPEN, HSPB и BJO1). Локализация каждого эпицентра определялась при совместной обработке записей не менее трех станций, при этом использовалась скоростная модель BARENTS. На рисунке хорошо видно, что эпицентры расположены вдоль хребта Гаккеля, однако смещены чуть южнее относительно осевой его части. Цепочка эпицентров повторяет все морфологические изгибы хребта Гаккеля, но наблюдаются их отклонения по широте, что объясняется несоответствием значений модельных скоростей сейсмических волн в этом регионе с реальными их значениями.

Поэтому нам представляется актуальным создание скоростной модели и годографов региональных сейсмических фаз для районов спрединговых хребтов Евро-Арктического региона. Особенно это важно и необходимо для определения координат эпицентров слабых землетрясе-

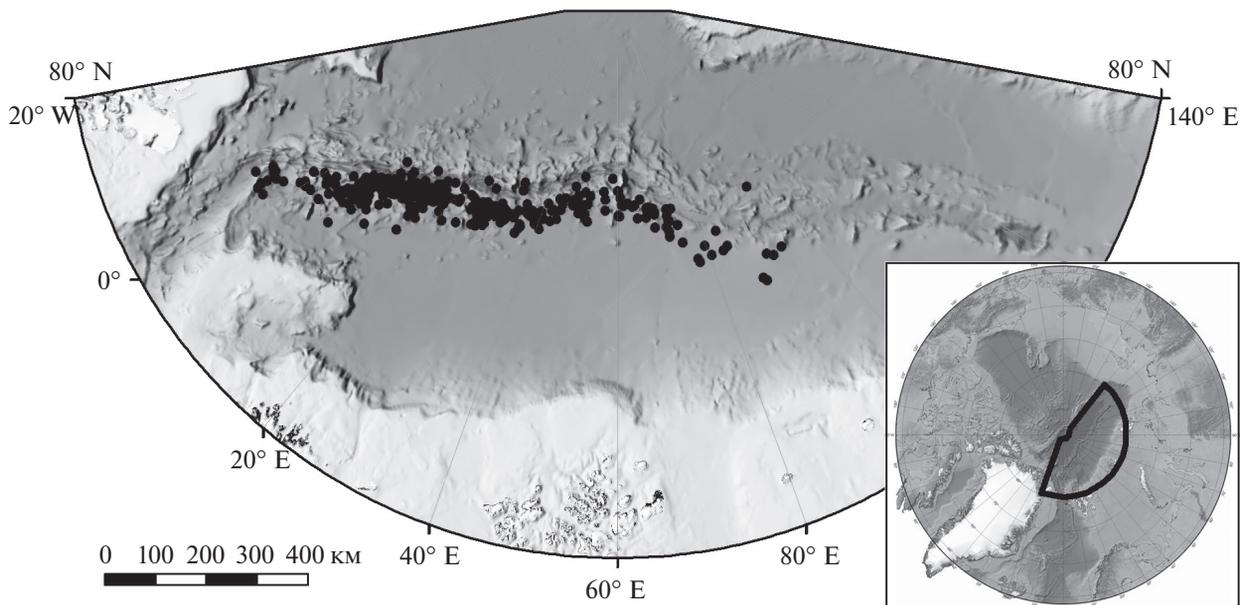


Рис. 1. Расположение эпицентров землетрясений, произошедших в пределах хребта Гаккеля за период с 2011 по 2014 гг. На врезке – местоположение исследованного района.

ний ($M < 3.0$), с хребтов Гаккеля и Книповича, которые регистрируются небольшим числом ближайших от эпицентров сейсмических станций, функционирующих на архипелагах Шпицберген и Земля Франца-Иосифа. Вычислению годографов и проверке их эффективности посвящена данная статья.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГОДОГРАФОВ

Вычисление годографов региональных сейсмических фаз P и S осуществлялось следующим образом. Применяя методологию приемных функций обменных волн (P-receiver functions [Vinnik, 1977]) была определена скоростная структура земной коры и верхней мантии для двух участков Евро-Арктического региона – архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа. Объектом исследования являются обменные волны Ps, преобразованные из продольных в поперечные на границах вблизи сейсмических станций. При этом нами рассматривается среда непосредственно под сейсмическими станциями SPA0 и ZFI, в так называемой подстанционной области. Ранее определение структуры земной коры и верхней мантии для архипелагов Шпицберген было проведено в работах [Ottmöller, Midzi, 2003; Wilde-Piorko et al., 2009], но по данным других станций.

Станция ZFI входит в Архангельскую сейсмическую сеть и функционирует на о. Земля Александры архипелага Земля Франца-Иосифа (80.81° с.ш.,

47.61° в.д.) [Morozov, Konechnaya, 2013]. Аппаратура сейсмической станции состоит из двух комплектов сейсмологического оборудования: короткопериодного датчика CMG-40T (фирма Guralp) с регистратором GSR-24 и широкополосного датчика CMG-6TD (фирма Guralp) с встроенным регистратором, установленных на расстоянии 260 м друг от друга. Широкополосная трехкомпонентная сейсмическая станция SPA0 входит в состав сейсмической группы SPITS агентства NOR SAR (Норвегия). Сейсмическая группа функционирует на архипелаге Шпицберген. Координаты станции SPA0: 78.17° с.ш. и 16.37° в.д.

В качестве исходных данных использовались широкополосные трехкомпонентные записи 120 землетрясений с эпицентральных расстояний от 35 до 90 градусов всех азимутальных направлений; магнитуды землетрясений – от 5.8 до 8.3, глубины очагов до 300 км. Для выделения обменных волн и выделения приемных функций выполнялся ряд процедур, основными из которых являются: частотная фильтрация исходных записей; поворот осей и преобразование системы координат ZNE в LQT, где компонента L – падающая продольная волна P, ось Q – искомая обменная волна SV, T – тангенциальная компонента; стандартизация с целью устранения различий в очаговых процессах и магнитудах путем деконволюции; получение индивидуальных приемных функций для каждого землетрясения; суммирование приемных функций от множества источников. Таким образом, на станциях ZFI и SPA0 по-

лучены параметры распределения обменных волн P_s , характеризующие среду в подстанционной области (рис. 2), на которые не влияет внешний источник.

На основе полученных данных были созданы скоростные модели V_s . Поиск оптимальной скоростной модели основан на общем способе решения некорректных обратных задач методом регуляризации Тихонова [Тихонов, Арсенин, 1979]. При этом задача сводится к решению системы линейных уравнений, параметрами которых являются скорости продольных и поперечных волн (V_p , V_s), плотность и мощность слоев. Использо-

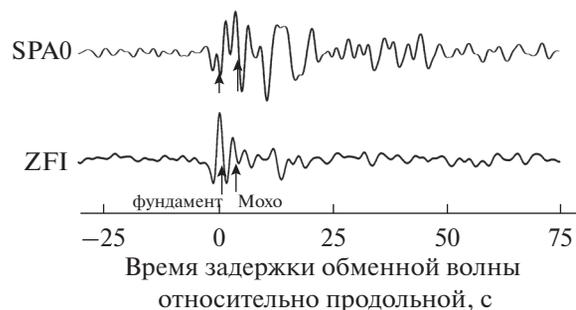


Рис. 2. Суммарные Р-приемные функции для станций ZFI и SPA0.

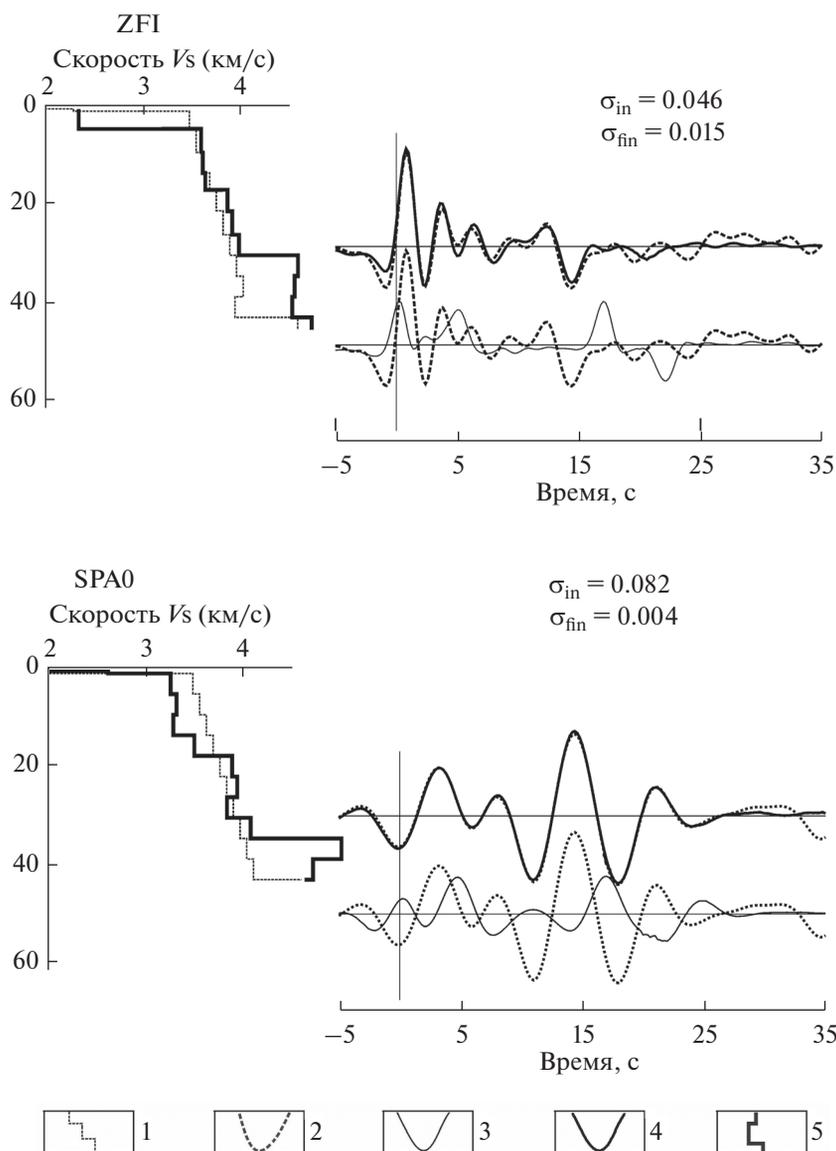


Рис. 3. Инверсия Р-приемных функций для сейсмических станций ZFI и SPA0.

1 – начальная модель среды, с которой начинается итеративный способ подбора; 2 – экспериментальная Р-функция приемника (Q -компонента); 3 – синтетическая Q -компонента, рассчитанная по начальной модели; 4 – синтетическая Q -компонента, имеющая в процессе подбора наименьшие отклонения от экспериментальной Q -компоненты; 5 – итоговая скоростная модель.



Рис. 4. Сравнение скоростных моделей.
1 – NOES, 2 – Sval, 3 – BARENTS, 4 – IASPE191, 5 – BARENTS3D.

валась модель, состоящая из тринадцати слоев в пределах глубин от 0 до 52 км, в которых скорости распространения сейсмических волн постоянны, лежащих на полупространстве. Вариации скоростей поперечных волн определялись при условии фиксированных значений $V_p/V_s = 1.732$ в коре и $V_p/V_s = 1.8$ в мантии. Плотность среды задавалась по Ф. Берчу [Birch, 1961]. Скоростные модели определяются итеративным способом путем подбора синтетической и экспериментальной кривой, процесс продолжается до тех пор, пока отклонение синтетической и экспериментальной кривой не достигнет величины погрешности, равной $\sigma_{fin} = 0.02$, либо будет меньше ее (рис. 3).

Полученные скоростные модели получили название NOES (North of Eurasian shelf) и Sval (Svalbard). Общей чертой полученных разрезов земной коры является наличие в ней нескольких границ раздела. При этом наиболее четко выделяются (сверху вниз): кровля кристаллического фундамента, граница внутри консолидированной коры на глубине ~ 17 км, поверхность Мохо. Скоростная

модель Sval хорошо согласуется с моделью, полученной ранее в работе [Ottmöller, Midzi, 2003].

На рис. 4 проведено сопоставление различных скоростных моделей V_p и V_s – NOES, Sval, BARENTS, IASPE191 и BARENTS3D. Модель BARENTS3D для территории Баренцева моря была разработана норвежско-американской группой на основе созданных ранее двух отдельных моделей – коры BARENTS50 [Ritzmann et al., 2006] и верхней мантии BARMOD [Levshin et al., 2007].

При сравнении моделей наблюдается схожее распределение скоростей волн, различие составляет не более 0.5 км/с. Отличительной чертой является разная глубина залегания кристаллического фундамента и поверхности Мохо, что обусловлено региональными особенностями и различной мощностью осадочного чехла и земной коры под архипелагами Шпицберген, Земля Франца-Иосифа и осредненными значениями для всей Земли.

На основе скоростных моделей NOES и Sval были вычислены региональные годографы сей-

смических фаз P и S, получившие одноименные названия. Модели NOES и Sval при создании годографов объединялись с моделью IASPEI91 для глубин ниже 50 км (табл. 1). Вычисление годографов производилось в программе “Layers_Travel_Time”, разработанной к.ф.-м.н. В.Э. Асмингом из Кольского филиала Геофизической службы РАН [Kremenetskaaya et al., 2004]. Годографы рассчитаны для эпицентральных расстояний в диапазоне от 0 до 30° с шагом 0.1° и для глубин очага: 0, 5, 10, 20 и 30 км.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГОДОГРАФОВ NOES и SVAL

Для проверки эффективности годографов NOES и Sval была проделана следующая работа. По каталогу International Seismological Centre (ISC) [International Seismological Centre ...] была составлена выборка землетрясений с $m_b \geq 4.0$, произошедших в Арктическом регионе за период с 2002 по 2012 гг. Параметры гипоцентра каждого землетрясения были рассчитаны по данным не менее 100 сейсмических станций, расположенных на разных расстояниях от эпицентров, а параметры отдельных землетрясений по данным 2500 станций. В связи с этим предполагается, что положения гипоцентров определены достаточно точно. В табл. 2 приведены данные по землетрясениям из каталога ISC, предназначенные для проверки годографов NOES и Sval, а на рис. 5 показано пространственное распределение эпицентров этих землетрясений.

Для сейсмических станций SPA0, KBS, HSPB, ZFI, BJO1 и HOPEN, функционирующих на архипелагах Шпицберген и Земля Франца-Иосифа (см. рис. 5), по годографам NOES, Sval, BARENTS, IASPEI91 и BARENTS3D* вычислялись значения эпицентральных расстояний для каждого землетрясения, отмеченного в табл. 2 по разнице времени вступлений сейсмических фаз P и S. Вычисленные значения эпицентральных расстояний

сравнивались с реальными расстояниями между станциями и эпицентрами землетрясений:

$$\delta\Delta^\circ = \Delta^\circ_{\text{вычисленное_расст.}} - \Delta^\circ_{\text{реальное_расст.}}$$

Значение $\delta\Delta^\circ$ позволяет характеризовать распределение точек на графике такими терминами, как “недолет” и “перелет”, т.е. когда вычисленное эпицентральное расстояние меньше или больше реального расстояния от станции до эпицентра землетрясения. Отметим, что при создании годографа BARENTS3D* мы использовали только 1-D скоростную модель в точке расположения сейсмических станций ZFI из всей трехмерной модели BARENTS3D.

Для сейсмических станций SPA0, KBS, HSPB, ZFI, BJO1 и HOPEN по разным годографам вычислялось время прихода сейсмических фаз P и S и сравнивалось с наблюдаемым на исходных записях:

$$\delta t = t_{\text{наблюдаемое}} - t_{\text{теоретическое}}$$

На рис. 6 и рис. 7 представлены результаты сравнения годографов, где по оси абсцисс показано расстояние между сейсмической станцией и эпицентром землетрясения в градусах, а по оси ординат – значение $\delta\Delta^\circ$ на рис. 6 и δt на рис. 7.

Доступ к исходным данным сейсмических станций SPA0, KBS, HSPB, BJO1 и HOPEN осуществлялся с помощью электронного ресурса GEOFON. Станция KBS входит в состав сети GE (GEOFON – Global Seismic Network), HSPB в сеть PL (Polish Seismic Network), HOPEN и BJO1 в сети NS (Norwegian National Seismic Network, University of Bergen Norway).

Результаты сравнения годографов NOES, Sval, BARENTS, IASPEI91 и BARENTS3D* приведены на рис. 6. В пределах эпицентральных расстояний до 3° на годографах практически одинаковый разброс, преимущественно “недолет”. Начиная с 3° для годографов IASPEI91 и Sval характерен сильный “недолет” эпицентральных расстояний, с

Таблица 1. Скорости распространения сейсмических волн в земной коре и верхней мантии в км/с по моделям NOES и Sval

| Модель NOES | | | Модель Sval | | |
|-------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
| Глубина, км | V_p | V_s | Глубина, км | V_p | V_s |
| 0 | 4.3 | 2.36 | 0 | 5.77 | 3.33 |
| 4 | 6.1 | 3.6 | 17 | 6.75 | 3.9 |
| 17 | 6.8 | 3.94 | 35 | 8.4 | 4.6 |
| 30 | 8.15 | 4.52 | 71 | 8.48 | 4.6 |
| 43 | 8.25 | 4.75 | 271 | 8.523 | 4.628 |
| 71 | 8.35 | 4.81 | | | |
| 210 | 8.373 | 4.556 | | | |
| 271 | 8.523 | 4.628 | | | |

Таблица 2. Каталог землетрясений с $m_b \geq 4.0$, произошедших в Арктическом регионе за период с 2002 по 2012 гг. Параметры гипоцентров приведены по данным International Seismological Centre (ISC)

| Дата | Время | Параметры гипоцентра | | | Магнитуда, m_b |
|------------|-------------|----------------------|-------------------|-----------------|------------------|
| | | $\varphi, ^\circ$ | $\lambda, ^\circ$ | $h, \text{ км}$ | |
| 2002-05-03 | 11:20:51.75 | 86.0010 | 31.5120 | 10.0f | 5.2 |
| 2003-07-04 | 07:16:43.45 | 76.3603 | 23.3677 | 0.4 | 5.7 |
| 2005-03-18 | 04:24:49.73 | 85.2492 | 91.7329 | 10.0f | 5.2 |
| 2005-08-06 | 04:02:30.42 | 85.2061 | 97.5848 | 7.1 | 5.3 |
| 2008-08-13 | 18:30:57.57 | 83.5319 | 114.5420 | 10.0f | 5.2 |
| 2009-03-05 | 19:41:41.29 | 80.2067 | -1.4032 | 14.4 | 5.4 |
| 2009-03-06 | 10:50:30.16 | 80.3143 | -1.9637 | 14.2 | 6.4 |
| 2009-05-17 | 19:24:21.40 | 82.5186 | -8.7914 | 16.0 | 5.4 |
| 2009-06-22 | 19:05:17.49 | 76.3002 | 6.8595 | 15.2 | 5.1 |
| 2009-06-22 | 18:15:40.09 | 76.3311 | 6.8091 | 13.1 | 5.3 |
| 2009-10-07 | 20:52:13.82 | 81.5856 | 120.0240 | 15.0 | 5.6 |
| 2011-10-02 | 20:54:42.10 | 77.3035 | 20.0068 | 2.7 | 4.0 |
| 2011-10-19 | 22:35:09.06 | 75.2577 | 9.4035 | 10.0f | 4.1 |
| 2011-11-19 | 21:04:21.76 | 81.1045 | -2.2170 | 10.0f | 4.5 |
| 2011-11-26 | 23:59:52.97 | 82.2287 | -6.2379 | 12.3 | 5.0 |
| 2011-12-24 | 22:39:06.85 | 77.5941 | 7.5859 | 10.0f | 4.5 |
| 2012-02-07 | 23:37:05.23 | 76.9170 | 7.2679 | 12.2 | 4.8 |
| 2012-05-26 | 03:27:01.40 | 85.9810 | 32.1040 | 9.0 | 5.1 |
| 2012-06-18 | 20:14:53.50 | 86.4070 | 41.5480 | 10.0 | 5.1 |
| 2012-09-02 | 12:44:03.46 | 78.4300 | 6.7640 | 10.0f | 5.4 |
| 2012-12-13 | 23:03:38.53 | 80.8040 | 121.3830 | 10.0f | 5.7 |

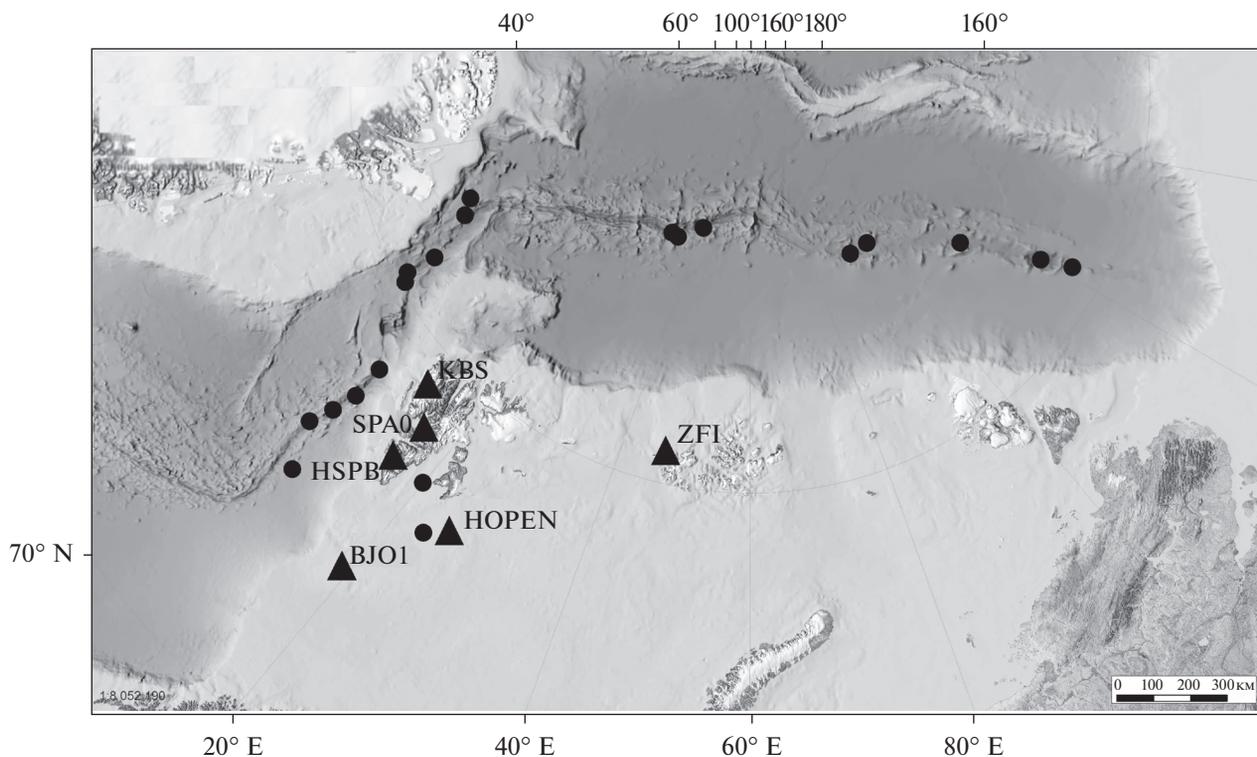


Рис. 5. Местоположение эпицентров землетрясений (см. табл. 2) и сейсмических станций на архипелагах Шпицберген и Земля Франца-Иосифа.

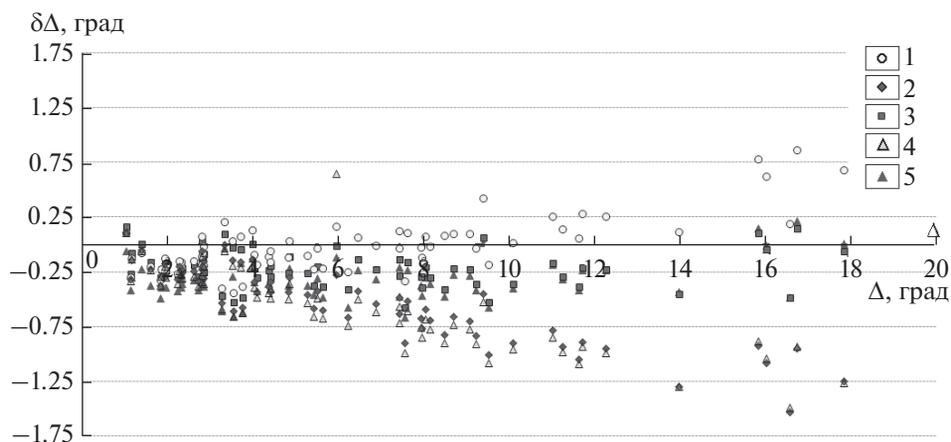


Рис. 6. Сравнения различных годографов по вычисленным эпицентральному расстояниям. 1 – NOES, 2 – Sval, 3 – BARENTS, 4 – IASPEI91, 5 – BARENTS3D*.

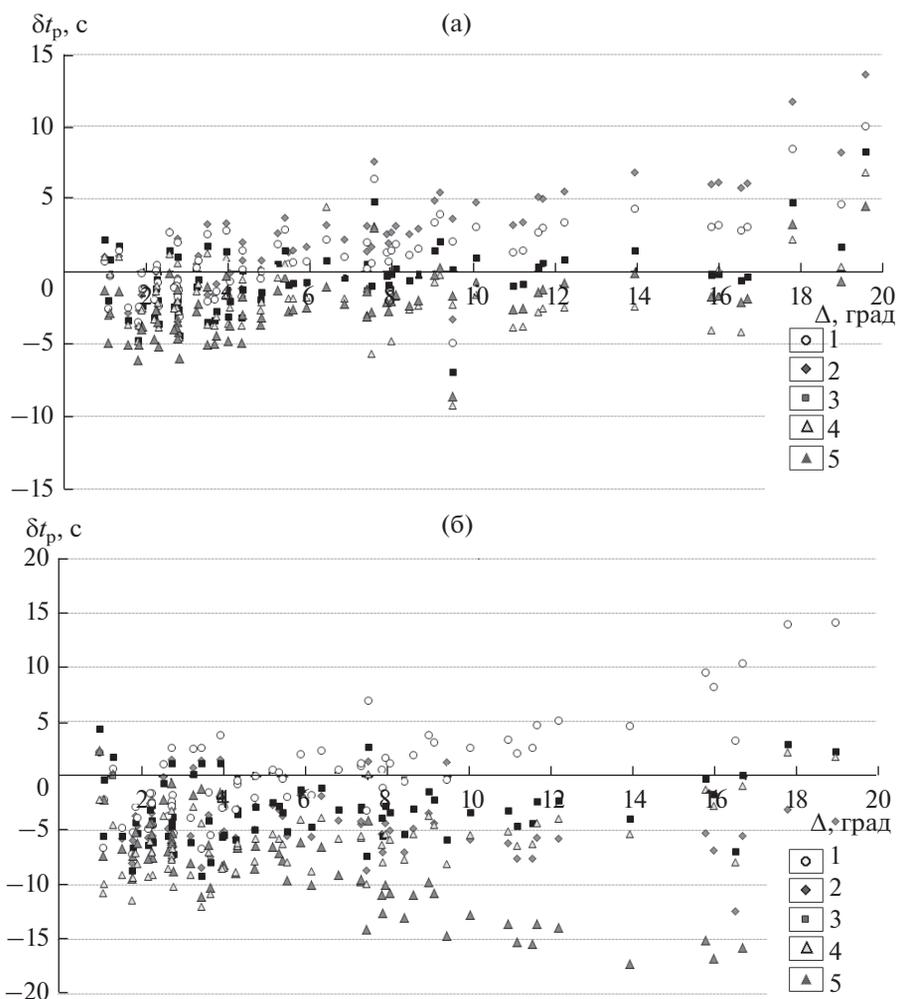


Рис. 7. Сравнения годографов по времени прихода волн.

а – для фазы P (δt_p); б – для фазы S (δt_s).

1 – NOES, 2 – Sval, 3 – BARENTS, 4 – IASPEI91, 5 – BARENTS3D*.

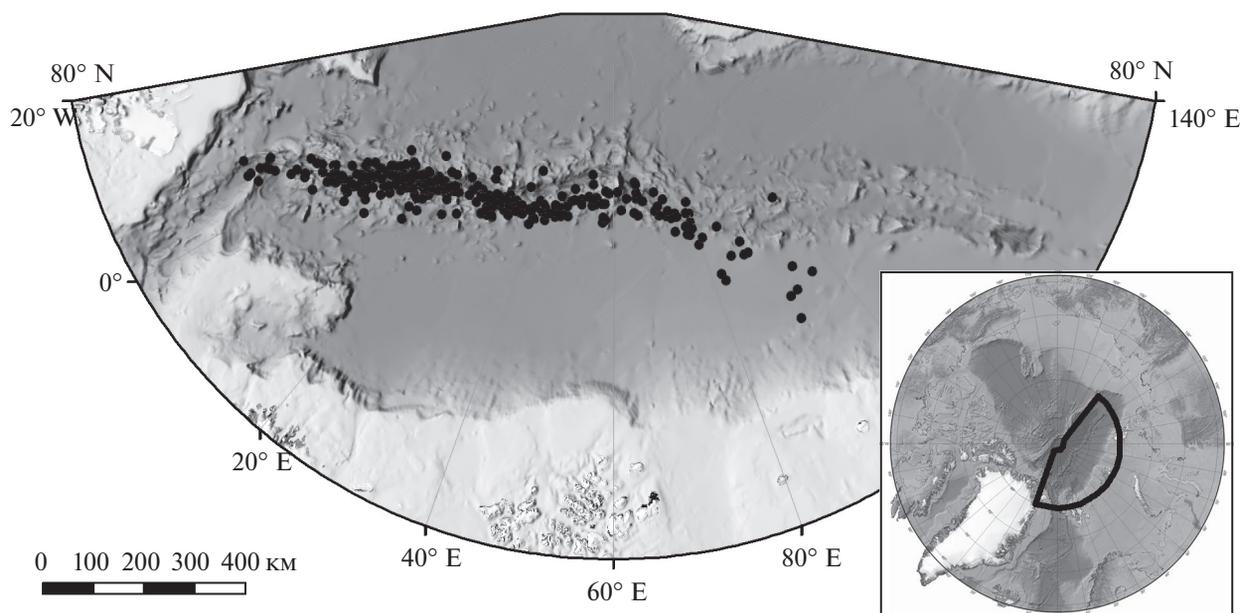


Рис. 8. Расположение эпицентров землетрясений, произошедших в пределах хребта Гаккеля за период с 2011 по 2014 гг. На врезке – местоположение исследованного района.

увеличением которых разброс возрастает и может достигать 1.5° , т.е. почти 170 км. Для годографа BARENTS в пределах всего рассматриваемого интервала расстояний (от 0° до 18°) характерен небольшой “недолет”, но разброс не превышает 0.5° . Для годографа NOES характерен несущественный разброс (в окрестностях нуля) до эпицентральных расстояний 10° , после начинается “перелет”, при этом в пределах эпицентральных расстояний от 0 до 14° он не превышает 0.25° .

Особенности распределения значений δt объясняют вариации значений $\delta\Delta^\circ$ (см. рис. 7). На расстояниях до 3° значения δt_p и δt_s всех годографов преимущественно меньше нуля. Начиная с расстояния 3° , только на годографах NOES и BARENTS значения δt_p и δt_s варьируют около нуля. Однако для годографа NOES это относится к эпицентральных расстояниям, не превышающим 14° , а для остальных характерны отрицательные значения δt_s в пределах расстояний от 0 до 20° .

На основе анализа значений $\delta\Delta^\circ$ и δt установлено, что использование годографа NOES при вычислении параметров арктических землетрясений приводит к меньшей ошибке в локации эпицентров, чем при использовании других годографов. Однако это условие справедливо только для эпицентральных расстояний, не превышающих 14° . Эффективность годографа NOES на рис. 8, где показано расположение эпицентров землетрясений за период с 2011 по 2014 гг., представленных ранее на рис. 1. Были пересчитаны параметры очагов землетрясений с использованием годографа NOES. Видно, что эпи-

центры до 40° в.д. распределены четко вдоль осевой линии хребта Гаккеля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием методологии приемных функций обменных волн P-receiver functions была определена скоростная структура земной коры и верхней мантии на двух участках Евро-Арктического региона – архипелагах Шпицберген и Земля Франца-Иосифа. Это позволило вычислить два годографа региональных сейсмических фаз P и S – NOES и Sval. Проверка эффективности годографов NOES, Sval, а также IASPEI91, BARENTS и BARENTS3D показала, что оптимальным для определения координат эпицентров землетрясений в районе спрединговых хребтов Евро-Арктического региона является годограф NOES. Положительный результат использования годографа NOES для этих целей наблюдался при исследовании практически всех областей спрединговых хребтов Евро-Арктического региона, при рутинной обработке записей сейсмических станций ZFI, SPA0, KBS, HSPB, BJO1 и HOPEN, а также при изучении проявлений сейсмичности хребтов Книповича и Гаккеля.

Работа выполнена по теме НИР № АААА-А16-116052710111-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Морозов А.Н., Ваганова Н.В. Годографы сейсмических волн для Севера Русской плиты по данным Архангель-

- ской сейсмической сети // Разведка и охрана недр. 2011. № 12. С. 48–51.
- Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 288 с.
- Birch F.* The velocity of compressional waves in rocks in 10 kilobars. Part 2 // *J. of Geophysical Res.* 1961. V. 66. Issue 7. P. 2199–2224.
- Dziewonski A. M., Andersen D.L.* Preliminary reference Earth model // *Phys. Earth Planet.* 1981. V. 25. P. 297–356.
- GEOFON [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://geofon.gfz-potsdam.de/geofon/> (дата обращения: 10.07.2015).
- Hicks E.C., Kværna T., Mykkeltveit S. et al.* Travel times and attenuation relations for regional phases in the Barents Sea region // *Pure and applied geophysics.* 2004. V. 161. Issue 1. P. 1–19.
- International Seismological Centre (ISC) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.isc.ac.uk/> (дата обращения: 10.07.2015).
- Jeffreys H., Bullen K.E.* Seismological Tables. British Association for the Advancement of Science. London, 1940. 50 p.
- Kennett B.L.N., Engdahl E.R.* Travel times for global earthquake location and phase identification // *Geophys. J. Int.* 1991. V. 105. P. 429–466.
- Kennett B.L.N., Engdahl E.R., Buland R.* Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes // *Geophys. J. Int.* 1995. V. 122. P. 108–124.
- Kremenetskaya E., Asming V., Ringdal F.* Seismic Location Calibration of the European Arctic // *Pure and applied geophysics.* 2001. V. 158. P. 117–128.
- Kremenetskaya E., Asming V., Vinogradov Yu.* Seismic profiling and calibration of seismic travel-time models for Barents region // *Geophysical Res. Abstracts.* 2004. V. 6. URL: 1607-7962/gra/EGU04-A-00881.
- Levshin A., Schweitzer J., Weidle Ch. et al.* Surface wave tomography of the Barents Sea and surrounding regions // *Geophys. J. Int.* 2007. V. 170(1). P. 441–459.
- Morozov A.N., Konechnaya Ya.V.* Monitoring of the Arctic region: contribution of the Arkhangelsk seismic network // *J. of Seismology.* 2013. V. 17(2). P. 819–827.
- Ottmöller L., Midzi V.* The crustal structure of Norway from inversion of teleseismic receiver functions // *J. of Seismology.* 2003. V. 7. P. 35–48.
- Ritzmann O., Maercklin N., Faleide J.I. et al.* A 3D geophysical model for the crust in the greater Barents Sea region: Database compilation, model construction and basement characterization // *Geophys. J. Int.* 2006. V. 170. P. 417–435.
- Vinnik L.P.* Detection of waves converted from P to S in the mantle // *Physics of the Earth and Planet. Interiors.* 1977. V. 15. P. 39–45.
- Wilde-Piorko M., Grad M., Wiejacz P., Schweitzer J.* HSPB seismic broadband station in Southern Spitsbergen: First results on crustal and mantle structure from receiver functions and SKS splitting // *Polish Polar Research.* 2009. V. 30. № 4. P. 301–316.