

УДК 550.311+550.341



О.А. Усольцева



Н.Г. Гамбурцева



А.Г. Гамбурцев

Усольцева О.А. *,
Гамбурцева Н.Г. **,
Гамбурцев А.Г. ***,
Никонов А.А. ****,
Кузнецов О.П. *****



А.А. Никонов



О.П. Кузнецов

Современные геодинамические процессы в литосфере Балтийского щита

*Усольцева Ольга Алексеевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН институт динамики геосфер РАН

**Гамбурцева Нина Григорьевна, кандидат физико-математических наук, ведущий инженер, Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта

***Гамбурцев Азарий Григорьевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта
E-mail: azgamb@mai.ru

****Никонов Андрей Алексеевич доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта

*****Кузнецов Олег Петрович, научный сотрудник, ФГБУН институт динамики геосфер РАН

В работе рассчитаны линейные тренды неравномерных и равномерных временных рядов времени пробега Р волн для станций Тромсе, Кево, Апатиты и Нурмиярми. Полученный результат хорошо согласуется с прежними результатами о высоком отрицательном линейном тренде в сейсмоактивных районах и почти нулевом тренде на платформенных территориях.

Ключевые слова: напряженное состояние, геодинамические процессы, метод сейсмического просвечивания, временные ряды времени пробега первой продольной волны, тренд, Балтийский щит, Восточно-Европейская платформа.

Современное состояние наук о Земле немыслимо без изучения геодинамических процессов – как древних, так и современных. Это изучение важно для понимания особенностей тектонической жизни Земли, процессов формирования полезных ископаемых, закономерностей подготовки землетрясений. Современные геодинамические процессы обусловлены тектонической жизнью Земли. В настоящей статье рассмотрены современные геодинамические процессы на Балтийском щите.

Балтийский (Фенноскандинавский) щит является одним из структурных элементов Восточно-Европейской платформы (ВЕП). С юга и юго-востока его ограничивает Русская плита, которая также является структурным элементом Восточно-Европейской платформы, а на северо-западе он граничит со складчатыми сооружениями палеозойской горной цепи Скандинавии (каледонидами).

По географическому местоположению Балтийский щит занимает восточную половину Скандинавского полуострова, Кольский полуостров, Карелию и включает в себя несколько крупнейших тектонических блоков: архейский на севере (возраст более 2000 млн лет), свекофеннский в центральной и юго-западной части (возраст 1750–2000 млн лет) и

свеко-норвежский на юго-западе (возраст 1000–1200 млн лет)¹.

По данным глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ)² строение литосферы Балтийского щита изучено достаточно подробно. Установлена горизонтальная неоднородность земной коры и ее значительная толщина, которая в центральной части щита достигает 65 км.

В данной работе приведены результаты долговременного просвечивания литосферы Балтийского щита сейсмическими волнами от глубоководных Гиндукушских землетрясений (ГГЗ) и глубоководных землетрясений на островах Фиджи (ГФЗ). Метод сейсмического просвечивания появился в первой половине XX в.³ Он применяется в разных модификациях и в разных пространственных и временных масштабах, и используется для изучения недр Земли, их строения, состояния вещества и развития тектонических процессов на трассах сейсмического события-станции. В данной работе мы анализируем сейсмические волны на очень больших расстояниях от источника. При этом волны заходят на большие глубины литосферы, на которой напряженно-деформированное состояние горных пород изменяется мало по сравнению с породами, залегающими в зоне выхода, которую лучи сейсмических волн проходят снизу вверх в почти вертикальном направлении. Изначально, в качестве источника сейсмических волн привлекались калиброванные подземные ядерные взрывы с Семипалатинского и Невадского полигонов, для которых известны с высокой точностью координаты и время проведения взрывов⁴. Но в 1996 г. в связи с запрещением испытаний ядерного оружия под землей эти взрывы прекратились, и ряды оборвались. Однако, оказалось, что взрывному источнику есть хорошая альтернатива – землетрясения, - о которой раньше не думали в связи с тем, что регулярные (режимные) просвечивания при использовании землетрясений в качестве источника имеют значительно меньшую точность из-за нестабильности землетрясений как источника. В статье В.В. Адушкина с соавт.⁵ показана возможность использования наряду с подземными взрывами глубоководных Гиндукушских землетрясений (ГГЗ) в качестве источника сейсмических волн при просвечивании недр Земли. Такой источник возбуждения можно считать достаточно стабильным (по сравнению с землетрясениями в других сейсмичных регионах земного шара). Такими наблюдениями можно пользоваться в целях сейсмического мониторинга литосферы. При этом длина ряда наблюдений может быть увеличена до 40 и более лет. По данным ГГЗ проведены исследования на 16 сейсмических станциях, расположенных в разных по своему тектоническому строению регионах⁶. Например, на станции Пржевальск (PRZ) в сейсмоактивном районе (Тянь-Шань), на станции Бодайбо (BOD) в районе с умеренной сейсмичностью (Забайкалье), на станции Пулково (PUL) на Восточно-Европейской платформе и на станции Ельцовка (ELT) на Сибирской платформе. В результате были выявлены временные вариации времен пробега сейсмических волн, вызванные изменениями напряженно-деформированного состояния пород земной коры и литосферы в зоне выхода сейсмического луча, т.е. в блоке под станцией наблюдения. Анализ и сопоставление линейных трендов временных рядов времен пробега сейсмических волн показал, что изменения напряженного состояния пород литосферы оказываются относительно слабыми на платформах и более сильными в сейсмически активных регионах.

Представляется важным провести подобные исследования литосферы Балтийского щита, т.к. эта территория, являясь частью практически асейсмичной Восточно-Европейской платформы, в то же время характеризуется умеренной сейсмической активностью. В данной работе с указанной целью определены линейные тренды для станций Тромсе (TRO), Кево (KEV), Апатиты (APA), Нурмиярми (NUR), расположенных на Балтийском щите и прилегающих территориях (рис. 1). Результаты проанализированы в сравнении с линейным трендом на станции Обнинск (OBN), расположенной на Восточно-Европейской платформе.

В качестве источника использованы также глубоководные землетрясения на островах Фиджи. Продемонстрировано, что интерпретируемые и сопоставимые результаты возможно получить при просвечивании сейсмическими лучами, проходящими только через мантию и сейсмическими лучами, проходящими по пути мантия-ядро-мантия.

Данные

Для анализа временных вариаций времен пробега сейсмических волн использовался бюллетень ЕНВ. Этот бюллетень создан на основе бюллетеня Международного Сейсмологического центра (ISC). Бюллетень ЕНВ содержит данные о 141 478 событиях в период с 1960 по 2008 гг. Основные преимущества бюллетеня ЕНВ в том, что в нем применяется новый высокоточный алгоритм локации⁷, при локации землетрясений используется современная одномерная модель ak135. Также в бюллетене ЕНВ приведено более качественное определение первых вступлений про-

¹ Abramovitz T., Thybo H., Perchub E. "Tomographic Inversion of Seismic P- and S-Wave Velocities from the Baltic Shield Based on FENNOLORA Data." *Tectonophysics* 358 (2002): 151–174.

² Janik T., Kozlovskaya E., Heikkinen P., Yliniemi J., Silvennoinen H. "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 (2009): B06308; Guggisberg B., Kaminski W., Prodehl C. "Crustal Structure of the Fennoscandian Shield: a Traveltime Interpretation of the Long-Range FENNOLORA Seismic Refraction Profile." *Tectonophysics* 195 (1991): 105–137.

³ Гамбурцев Г.А. Избранные труды. Т. 1. М.: Наука, 2003. С. 382–387.

⁴ Гамбурцева Н.Г., Люкэ Е.И., Николаевский В.Н., Орешин С.И., Пасечник И.П., Перегонцева В.Е., Рубинштейн Х.Д. Периодические вариации параметров сейсмических волн при просвечивании литосферы мощными взрывами // Докл. АН СССР. 1982. Т. 266. С. 1349–1353; Адушкин В.В., Ан В.А., Каазик П.Б., Овчинников В.М. О динамических процессах во внутренних геосферах Земли по временам пробега сейсмических волн // Докл. РАН. 2002. Т. 381. № 6. С. 822–824.

⁵ Адушкин В.В., Гамбурцев А.Г., Гамбурцева Н.Г., Несеркина М.А., Санина И.А., Сидоренков Н.С., Султанов Д.Д., Усольцева О.А. О возможном вкладе глобальных воздействий в ритмическую структуру современных геодинамических процессов // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 4. М.: Светоч Плюс, 2009. С. 63–70.

⁶ Гамбурцева Н.Г., Гамбурцев А.Г., Сидоренков Н.С., Усольцева О.А. Современные геодинамические процессы в зонах коллизии по данным сейсмического просвечивания литосферы // Атлас временных вариаций природных антропогенных и социальных процессов, Т. 5. М.: Янус-К, 2013. С. 193–198; Адушкин В.В., Гамбурцева Н.Г., Султанов Д.Д., Санина И.А., Несеркина М.А., Усольцева О.А. О результатах долговременного просвечивания литосферы сейсмическими волнами сильных взрывов и землетрясений // Докл. РАН. 2007. Т. 418. № 1. С. 95–100.

⁷ Engdahl E.R., Van der Hilst R., Buland R. "Global Teleseismic Earthquake Relocation with Improved Travel Times and Procedures for Depth Determination," *Bull. Seism. Soc. Am.* 88 (1998): 722–743.

дольных и поперечных объемных волн, Для бюллетеня ЕНВ отобраны землетрясения с более высокими, в среднем, магнитудами и в более узком диапазоне значений.

Глобальная одномерная скоростная модель ak135 была представлена в 1995 г.¹ Эта модель обеспечивает значительно лучшее приближение для большого количества сейсмических фаз, чем предыдущие. Предшественницами модели ak135 были модели IASP91², PREM³, модель Джеффриса – Буллена⁴.

Нами отобраны землетрясения из двух разных районов. 1-й район – Афганская зона Гиндукуша с координатами 36°–37° с.ш. и 70,2°–71,5° в.д. и глубинами землетрясений в диапазоне от 150 км до 250 км. 2-й район – острова Фиджи с координатами 17,3°–18,3° ю.ш. и 178,0°–179,0° з.д. и глубинами землетрясений в диапазоне от 520 км до 620 км.

Карта используемых в работе станций, наложенная на карту сейсмичности данного района, представлена на рис. 1. Из рисунка видно, что наибольшая плотность эпицентров наблюдается на юго-западной оконечности Скандинавского полуострова. В северной и центральной частях Фенноскандии отмечаются вытянутые области скопления эпицентров землетрясений в направлении с северо-запада на юго-восток. Одна из этих вытянутых зон начинается в районе станции TRO, другая в районе станции KEV, третья простирается вдоль западного побережья Ботнического залива. Южнее станции APA отмечается субшироко направленная сейсмогенерирующая зона с высокой плотностью событий. Анализ каталога показывает, что изучаемая территория, если судить по наблюдениям за 40 с небольшим лет, относится к районам с умеренной сейсмичностью, т.к. для 90% землетрясений магнитуда mb менее 3, а большинство землетрясений произошло на глубинах до 40 км.

Используемое для построения временных рядов количество точек приведено в табл. 1. Для ГГЗ отобраны фазы P преломленных сейсмических волн, которые являются первыми на эпицентральных расстояниях до ~96°. Для ГФЗ отобраны фазы PKPdf (PKIKP) сейсмических волн, которые являются первыми преломленными волнами на эпицентральных расстояниях ~116°–180°. Значения азимутов источн-станции и эпицентральных расстояния таковы, что сейсмический луч погружается на глубину 800–1000 км. Для ГФЗ сейсмический луч проходит, через мантию, внешнее ядро, потом через внутреннее ядро, а затем опять проходит через внешнее ядро и мантию. В зоне выхода для двух районов траектории сейсмических лучей почти вертикальны. Наиболее вероятно, что толщина блока земной коры, изменения напряженно-деформированного состояния которого возможно выявить при сейсмическом просвечивании, связана с глубинами, происходящих на Балтийском щите землетрясений, т.е. около 40 км.

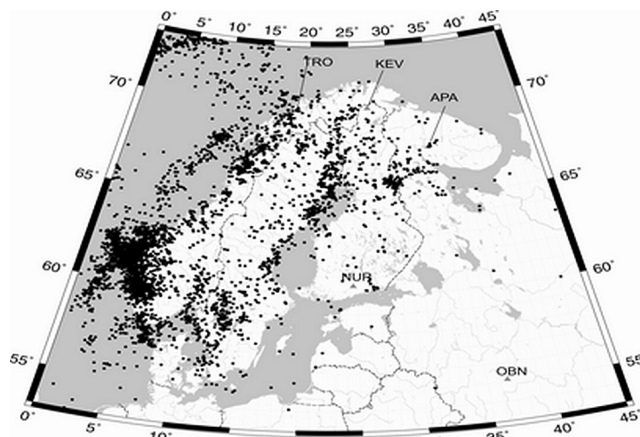


Рис. 1. Сейсмические станции TRO, KEV, APA, NUR, OBN, а также землетрясения на Балтийском щите и прилегающих территориях (черные точки) за период с 1964 по 2008 гг. С сайта www.seismo.helsinki.fi.

Таблица 1

Информация об используемых в работе данных и результат анализа аппроксимирующих линейных зависимостей

Coef – коэффициент при линейном тренде, dt – изменение приведенного времени пробега за весь период наблюдений, tсред – среднее приведенное время, dtотн (%) – относительное изменение приведенного времени пробега за весь период наблюдения в %

Станция, кол. точек	Период наблюдений	Колич. лет	Азимут источн-станции (град.)	Эпиц. расст. (град.)	Coef (с/год)	dt (с)	tсред	dtотн (%)
1-й район – Гиндукуш								
KEV, 375	1964–2008	45	338	41	-0,0157	-0,69	441,35	-0,16
NUR, 447	1961–2003	43	324	38	-0,0084	-0,35	416,89	-0,08
APA, 156	1961–1993, 2000–2008	42	337	38	-0,0065	-0,30	415,42	-0,07
TRO, 221	1961–2008	48	336	43	-0,0036	-0,17	461,35	-0,04
OBN, 397	1970–2008	39	319	30	0,0026	0,10	349,14	0,03
2-й район – острова Фиджи								
KEV, 137	1965–2008	44	349	126	-0,0281	-1,21	1076,14	-0,11
OBN, 141	1970–2008	39	332	134	-0,0063	-0,24	1092,9	-0,02

Анализ временных рядов волн PKPdf для станций, расположенных на сейсмически не активной территории Антарктиды⁵ показал, что существует зависимость времени пробега волн PKPdf от календарного времени, связанная с внутренним ядром. Следовательно, в районе с умеренной сейсмичностью для волн PKPdf логично ожидать совокупность двух

¹ Kennett, B.L.N., Engdahl E.R., Buland R. "Constraints on Seismic Velocities in the Earth from Traveltimes." *Geophys. J. Int.* 122 (1995): 108–124.

² Kennett B.L.N., Engdahl E.R. "Traveltimes for Global Earthquake Location and Phase Identification." *Geophys. J. Int.* 105 (1991): 429–465.

³ Dziewonski A.M., Anderson D.L. "Preliminary Reference Earth Model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 25 (1981): 297–356.

⁴ Jeffreys H., Bullen K.E. *Seismological Tables*. London: British Association for the Advancement of Science, 1940. 50 p.

⁵ Овчинников В.М., Каазик П.Б. Временные тренды невязок времен пробега сейсмических волн в земном ядре и дифференциальное вращение внутреннего ядра // *Динамические процессы в геосферах: Сб. научн. трудов ИДГ РАН. Вып. 2. М.: ГЕОС, 2011. С. 10–19.*

временных трендов, связанных с ядром и с зоной выхода. По 2-му району представлены результаты только для станций KEV и OBN. Продолжительность анализируемого периода наблюдений для разных станций составляет 39–48 лет (табл. 1).

Методика построения временных рядов

Методика построения и анализа временных рядов по данным от землетрясений частично описана в работе В.В. Адушкина с соавт.¹ В качестве исследуемого параметра используется t – время пробега первой продольной волны. Значения времен приводились к одной глубине (поправка $\delta t_{\text{глубина}}$) и одному гипоцентральному расстоянию (поправка $\delta t_{\text{гипоц_расст}}$) по формуле

$$t_{\text{привед}} = t + \delta t_{\text{глубина}} - \delta t_{\text{гипоц_расст}} \quad (1)$$

Временная поправка за глубину рассчитывалась по формуле:

$$\delta t_{\text{глубина}} = (d - d_{\text{привед}}) / V_{\text{лин}} \quad (2)$$

где d – глубина землетрясения, $d_{\text{привед}}$ – глубина приведения (для ГГЗ равна 200 км, для ГФЗ равна 570 км), $V_{\text{лин}}$ – скорость, определенная по годографу. Годограф строится на основе имеющихся данных для данной станции. Временная поправка, учитывающая разные гипоцентральные расстояния, рассчитывалась по формуле:

$$\delta t_{\text{гипоц_расст}} = (N_{\text{ур}} - N_{\text{урпривед}}) / V_{\text{лин}} \quad (3)$$

где $N_{\text{ур}}$ – расстояние по прямой линии между станцией и землетрясением, $N_{\text{урпривед}}$ – среднее расстояние по всем землетрясениям для данной станции.

Дальнейшая методика исследования включает в себя построение зависимости $t_{\text{привед}}$ от календарного времени и аппроксимации имеющихся данных линейной функцией с оценкой доверительного интервала. Как известно, существуют два вида доверительных интервалов. Доверительным интервалом для новых наблюдений называют ограниченную двумя линиями полосу, в которую новое наблюдение попадет с заданной вероятностью. Доверительным интервалом для новых аппроксимирующих функций называют ограниченную двумя линиями полосу, в которой при появлении новых наблюдений будет лежать новая аппроксимирующая функция с заданной вероятностью. В работе рассчитывались оба вида доверительных интервалов: связанный с новыми наблюдениями для характеристики разброса данных, связанный с новыми функциями для определения значимости линейного тренда. Дополнительно, чтобы исключить нежелательные искажения в количественных оценках, связанные с неравномерностью распределения наблюдений во времени, рассчитаны среднегодовые значения времен пробега для всех станций и дисперсия относительно среднего. Построены линейные и полиномиальные аппроксимирующие функции по среднегодовым временным рядам. Проанализированы коэффициенты при линейных функциях для обычных и среднегодовых временных рядов.

Результаты

На рис. 2 и 3 представлены временные ряды по данным от ГГЗ и ГФЗ соответственно. В табл. 1 приведены вычисленные коэффициенты при линейных трендах для станций KEV, NUR, APA, TRO, OBN, а также величины изменения приведенного времени пробега за весь период наблюдений. Как видно из рис. 2 и 3, разброс первичных данных велик: для Р волн 3–4 сек., для РКРdf волн ~8 сек. Расчет доверительного интервала для новых наблюдений показывает, что в 60% случаев новые наблюдения будут находиться в полосе шириной 2–2,5 сек для Р волн и 6–7 сек для РКРdf волн. Т.к. разброс данных велик, а коэффициенты при линейных функциях малы, проведена оценка значимости слабоотрицательного линейного тренда с помощью расчета доверительного интервала для новых функций. Выяснилось, при каком значении вероятности линейный тренд с учетом доверительного интервала для новых функций действительно будет отрицательным, т.е. нижняя граница доверительного интервала в начальной точке будет выше верхней границы доверительного интервала в конечной точке. Оказалось, что для TRO тренд становится отрицательно значимым при 50%-ном доверительном интервале, для APA при 65%-ном, а для NUR и KEV тренд отрицательно значим при 95%-ном доверительном интервале. Значит, проведенные оценки по ГГЗ (табл. 1) для станций NUR и KEV являются более достоверными, а для станций TRO и APA менее достоверными.

Согласно табл. 1, максимальный линейный тренд (изменение приведенного времени пробега dt равно 0,69 сек за 45-летний период, станция KEV) наблюдается в центральной части Балтийского щита на севере, меньше в центральной части Балтийского щита на юге (dt равно 0,35 сек за 43 года, ст. NUR), еще меньше на восточной и западной оконечности Балтийского щита (ст. APA и TRO). Для всех четырех станций характерно уменьшение времени пробега с увеличением календарного времени. Напротив, для платформенной станции OBN по Р волнам линейный тренд слабо положительный.

По РКРdf волнам (рис. 3) наблюдается слабо отрицательный тренд для OBN и более сильный отрицательный тренд для станции KEV. Мы предполагаем, что линейный тренд, связанный с ядром для двух станций отличаются незначительно, т.к. траектории сейсмических лучей станции OBN и станции KEV в ядре находятся гораздо ближе друг к другу, чем в зонах выхода. Следовательно, с Балтийским щитом по РКРdf волнам связана разность линейных трендов на станции KEV и на станции OBN, т.е. 0,97 сек за 44-летний период наблюдений на станции KEV, что сопоставимо с линейным трендом 0,69 сек, полученном по Р волнам. Иначе говоря, на рис. 3 та часть тренда, которая отличает станцию KEV от станции OBN, в большей мере, является специфической особенностью зоны выхода под станцией.

В отличие от представленных на рис. 2 и 3 неравномерных временных рядов, на рис. 4 приведены равномерные ряды среднегодовых времен пробега Р волн от ГГЗ. Переход к равномерным рядам проведен для исключения ошибки, связанной с неравномерностью распределения данных. Характеристики линейных трендов для равномерных рядов представлены в табл. 2. Сравнение табл. 2 и табл. 1 показывает, что общие особенности линейных трендов: максимальный отрицательный тренд на KEV, чуть меньше на NUR, еще меньше на APA и TRO, – после оцифровки с равномерным шагом сохраняются. В табл. 2 наблюдается уменьшение разброса результатов для станций на Балтийском щите по сравнению с табл. 1.

¹ Адушкин В.В., Гамбурцева Н.Г., Нестеркина М.А., Санина И.А., Султанов Д.Д., Усольцева О.А. О связи вариаций времен пробега сейсмических волн с изменениями скорости вращения Земли // Физика Земли. 2010. № 3. С. 66–78.

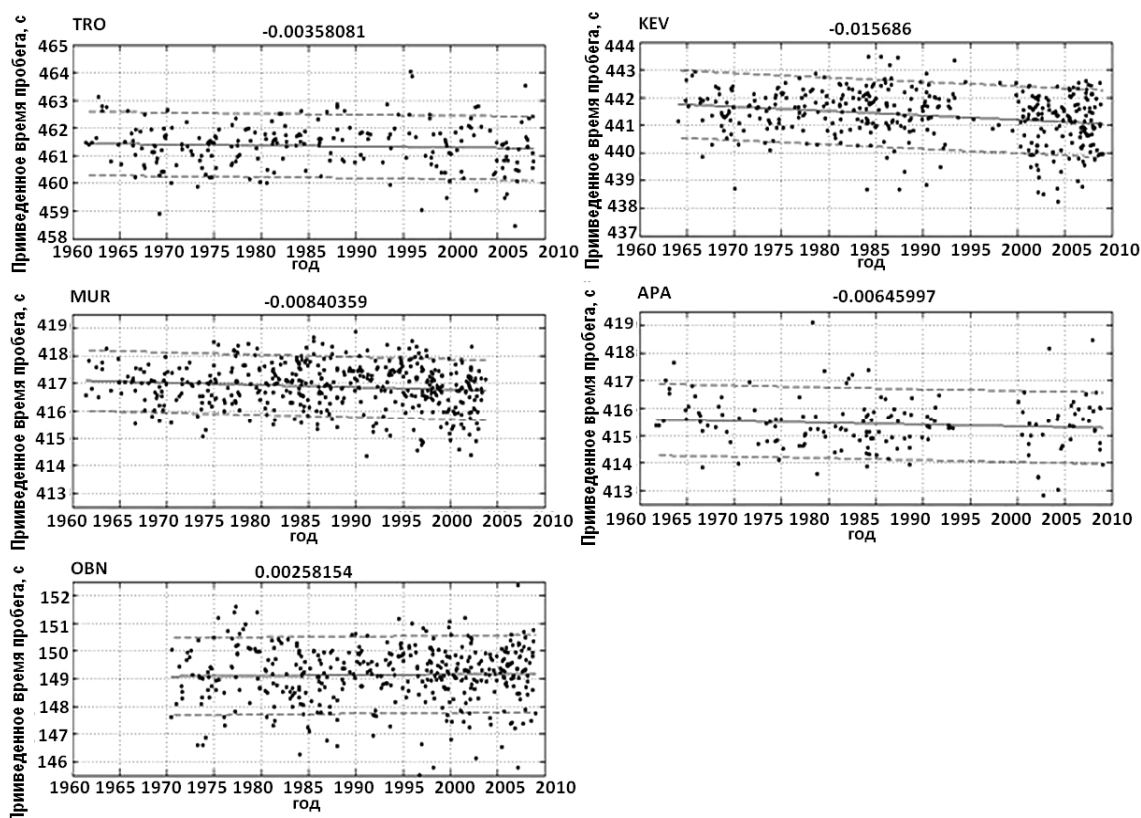


Рис. 1 Временные ряды приведенных времен пробега Р волн для станций TRO, KEV, NUR, APA, OBN по данным от ГФЗ. Точки – значения, сплошная линия – линейные тренды, пунктирная линия – 60% доверительный интервал для новых наблюдений.

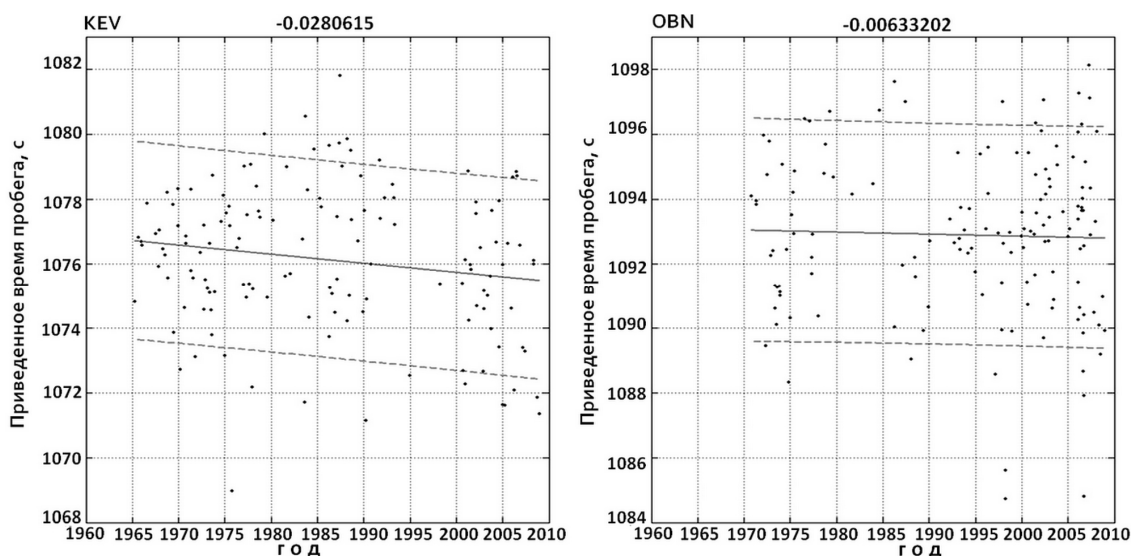


Рис. 2. Временные ряды приведенных времен пробега волн PKPdf для станций KEV и OBN по данным от ГФЗ. Точки – значения, сплошная линия – линейные тренды, пунктирная линия – 60% доверительный интервал для новых наблюдений.

Таблица 2
Коэффициенты при линейном тренде (Coef) и полное изменение времени пробега dt за весь период наблюдения при линейной аппроксимации для среднегодовых временных рядов (станции TRO, KEV, NUR, APA, OBN) по данным от ГФЗ

Станция	Coef (с/год)	dt (с)
KEV	-0,0094	-0,42
NUR	-0,0074	-0,32
APA	-0,0054	-0,26
TRO	-0,0048	-0,23
OBN	0,0017	0,07

В табл. 2 для станций KEV, NUR, APA коэффициент наклона линейной аппроксимирующей функции уменьшается, а на TRO увеличивается. При аппроксимации временных рядов полиномиальной функцией для станций TRO и NUR наблюдается аналогичное расположение максимума и минимума на кривой (рис. 4). Выделяется 2 временных периода: 1-й – с 1965–1967 по 1980 гг., 2-й – с 1980 по 1995–2000 гг. Продолжительность этих периодов соответственно 13–15 лет, 15–20 лет.

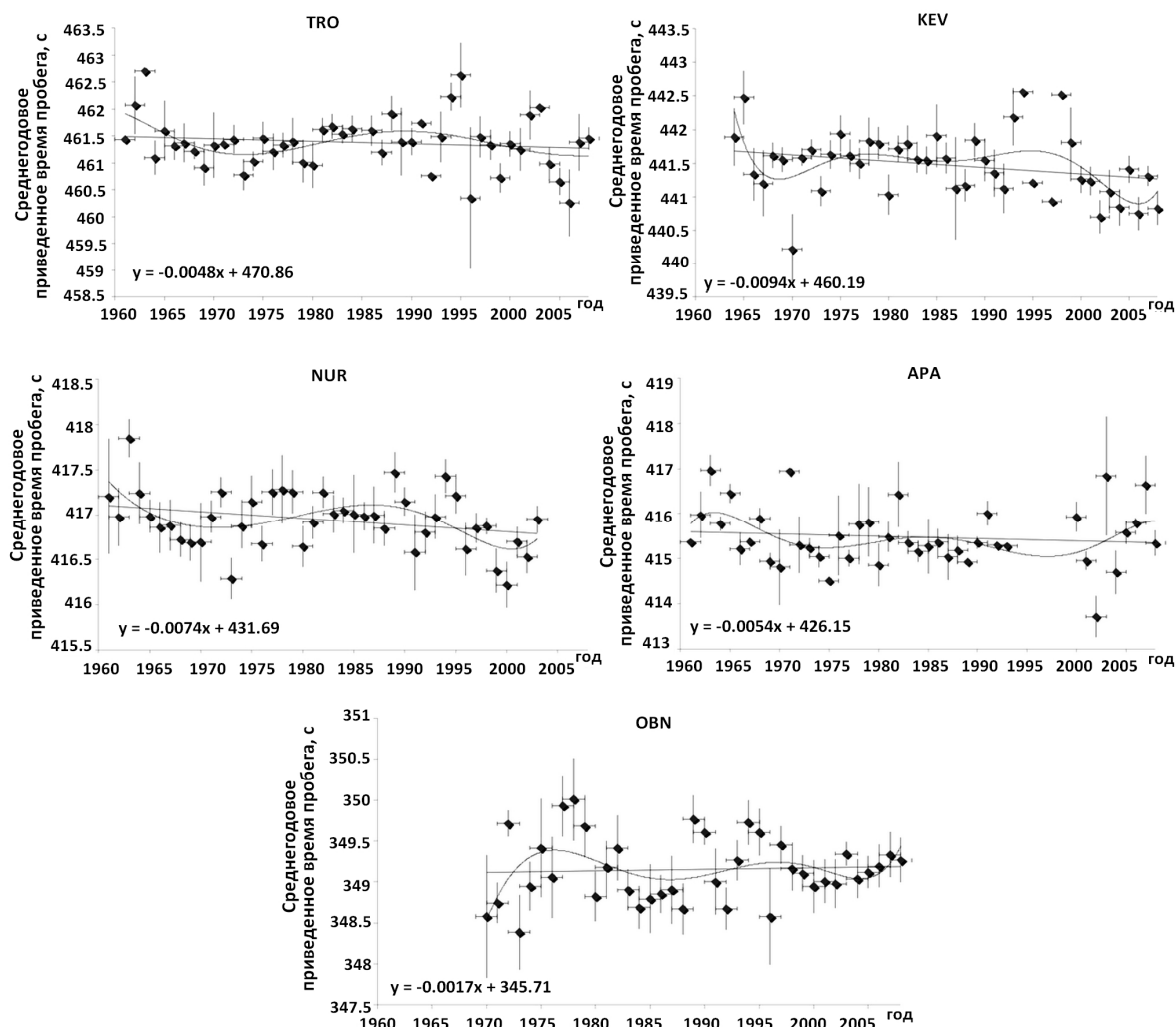


Рис. 4. Временные ряды приведенных среднегодовых времен пробега Р волн для станций TRO, KEV, NUR, APA, OBN по данным от ГГЗ. Обозначена дисперсия относительно среднего для каждого значения. Показан результат аппроксимации линейной функцией и полиномом 6-го порядка для каждой станции.

Заключение

В работе впервые проведен анализ временных рядов для станций Балтийского щита и прилегающих территорий по данным ГГЗ и ГФЗ. Предыдущие исследования данным методом показали, что коэффициент наклона $t_{\text{привед}}$ по линейному тренду значительно больше для сейсмоактивных районов (например, для Тянь-Шаня), чем для платформенных территорий¹. В настоящей работе коэффициент наклона $t_{\text{привед}}$ по линейному тренду для станций на Балтийском щите больше коэффициента наклона $t_{\text{привед}}$ на ВЕП. На примере станции KEV показано, что оперируя разностью линейных трендов для станций, расположенных на платформе и в сейсмоактивном районе на небольшом удалении друг от друга, в задачах долговременного просвечивания возможно использовать волны РКРdf.

Анализ взаимного местоположения исследуемых станций и землетрясений за период с 1964 по 2008 гг. (рис. 1) показывает, что в районе станций OBN и NUR сейсмические события происходят редко, в районе станции APA чаще наблюдаются сейсмические события, а станции KEV и TRO расположены близ локальных сейсмогенерирующих структур. Корреляция между плотностью землетрясений в районах расположения станций (рис. 1) и линейными трендами для Балтийского щита не выявлена. Зато отмечены общие периодические зависимости изменений приведенных времен пробега Р волн от времени для станций TRO и NUR (рис. 4), пока не объясненные.

Численный сравнительный анализ линейных трендов для скандинавских станций и станций, представленных в исследовании В.В. Адушкина с соавт.², затруднителен из-за использования разных входных данных и различий в

¹ Адушкин В.В., Гамбурцева Н.Г., Султанов Д.Д., Санина И.А., Нестеркина М.А., Усольцева О.А. О результатах долговременного просвечивания литосферы...

² Адушкин В.В., Гамбурцева Н.Г., Нестеркина М.А., Санина И.А., Султанов Д.Д., Усольцева О.А. О связи вариаций времен

методе обработке данных. В указанной работе В.В. Адушкина с соавт. источником является бюллетень ISC, в данной работе используется бюллетень ЕНВ. На качественном уровне для бюллетеня ЕНВ, сделанный ранее вывод о повышенном отрицательном линейном тренде $t_{привед}$ для станций в сейсмоактивных районах (PRZ), слабо отрицательном в районах с умеренной сейсмичностью (BOD, KEV, NUR) и почти полном отсутствии линейного тренда на платформах (OBN, PUL, ELT) подтверждается. Несмотря на большой разброс исходных данных (3–4 сек) в этой и других работах оценки, связанные с уменьшением среднего приведенного времени пробега на величины около 0,4 сек за весь период наблюдения, имеют право на существование из-за длительного периода наблюдений и хорошей согласованности результатов по разным станциям.

Выводы

1. Породы литосферы Балтийского щита и Восточно-Европейской платформы имеют разный уровень напряжений и разные значения скорости и амплитуд изменения этих напряжений во времени за 40–50 лет.
2. Чем более сейсмически активны рассматриваемые крупные структурные области, тем выше оказываются (по изученному параметру) уровень напряжений в них и больше его колебания во времени.
3. Насколько позволяют судить полученные по четырем станциям результаты, разные части (сектора) щита различаются по уровню напряженного состояния, но на всех изученных частях эти изменения меньше, чем таковые на платформе.
4. Судя по выявленным трендам за полвека, уровень напряжений на щите подвержен флуктуациям длительностью по 13–15 лет, что не отмечено на платформе.

Обнаруженные (впервые для указанного периода и независимым способом) закономерности открывают возможность на следующем этапе исследования проводить в пределах тех же крупных структурных элементов сопоставления показателей напряженного состояния с параметрами сейсмичности и тектонической подвижности для лучшего понимания геодинамики северной части Европы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адушкин В.В., Ан В.А., Каазик П.Б., Овчинников В.М. О динамических процессах во внутренних геосферах Земли по временам пробега сейсмических волн // Докл. РАН. 2002. Т. 381. № 6. С. 822–824.
2. Адушкин В.В., Гамбурцев А.Г., Гамбурцева Н.Г., Несеркина М.А., Санина И.А., Сидоренков Н.С., Султанов Д.Д., Усольцева О.А. О возможном вкладе глобальных воздействий в ритмическую структуру современных геодинамических процессов // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 4. М.: Светоч Плюс, 2009. С. 63–70.
3. Адушкин В.В., Гамбурцева Н.Г., Несеркина М.А., Санина И.А., Султанов Д.Д., Усольцева О.А. О связи вариаций времен пробега сейсмических волн с изменениями скорости вращения Земли // Физика Земли. 2010. № 3. С. 66–78.
4. Адушкин В.В., Гамбурцева Н.Г., Султанов Д.Д., Санина И.А., Несеркина М.А., Усольцева О.А. О результатах долговременного просвечивания литосферы сейсмическими волнами сильных взрывов и землетрясений // Докл. РАН. 2007. Т. 418. № 1. С. 95–100.
5. Гамбурцев Г.А. Избранные труды. Т. 1. М.: Наука, 2003. 525 с.
6. Гамбурцева Н.Г., Гамбурцев А.Г., Сидоренков Н.С., Усольцева О.А. Современные геодинамические процессы в зонах коллизии по данным сейсмического просвечивания литосферы // Атлас временных вариаций природных антропогенных и социальных процессов, Т. 5. М.: Янус-К, 2013. С. 193–198.
7. Гамбурцева Н.Г., Люкэ Е.И., Николаевский В.Н., Орешин С.И., Пасечник И.П., Перегонцева В.Е., Рубинштейн Х.Д. Периодические вариации параметров сейсмических волн при просвечивании литосферы мощными взрывами // Докл. АН СССР. 1982. Т. 266. С. 1349–1353.
8. Николаев Н.И. Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. М.: Недра, 1988, 491 с.
9. Овчинников В.М., Каазик П.Б., Временные тренды невязок времен пробега сейсмических волн в земном ядре и дифференциальное вращение внутреннего ядра // Динамические процессы в геосферах: Сб. научн. трудов ИДГ РАН. Вып. 2. М.: ГЕОС 2011. С. 10–19
10. Abramovitz T., Thybo H., Perchub E. "Tomographic Inversion of Seismic P- and S-wave Velocities from the Baltic Shield Based on FENNOLORA Data." *Tectonophysics* 358 (2002): 151–174.
11. Dziewonski A.M., Anderson D.L. "Preliminary Reference Earth Model." *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 25 (1981): 297–356.
12. Engdahl E.R., Van der Hilst R., Buland R. "Global Teleseismic Earthquake Relocation with Improved Travel Times and Procedures for Depth Determination," *Bull. Seism. Soc. Am.* 88 (1998): 722–743.
13. Guggisberg B., Kaminski W., Prodehl C. "Crustal Structure of the Fennoscandian Shield: a Traveltime Interpretation of the Long-Range FENNOLORA Seismic Refraction Profile." *Tectonophysics* 195 (1991): 105–137.
14. Janik T., Kozlovskaya E., Heikkinen P., Yliniemi J., Silvennoinen H. "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 (2009): B06308.
15. Jeffreys H., Bullen K.E. *Seismological Tables*. London: British Association for the Advancement of Science, 1940. 50 p.
16. Kennett B.L.N., Engdahl E.R. "Traveltimes for Global Earthquake Location and Phase Identification." *Geophys. J. Int.* 105 (1991): 429–465.
17. Kennett, B.L.N., Engdahl E.R., Buland R. "Constraints on Seismic Velocities in the Earth from Traveltimes." *Geophys. J. Int.* 122 (1995): 108–124.

Цитирование по ГОСТ Р 7.0.11—2011:

Усольцева, О. А., Гамбурцева, Н. Г., Гамбурцев, А. Г., Никонов, А. А., Кузнецов, О. П. Современные геодинамические процессы в литосфере Балтийского щита / О.А. Усольцева, Н.Г. Гамбурцева, А.Г. Гамбурцев, А.А. Никонов, О.П. Кузнецов // *Пространство и Время*. — 2015. — № 1—2(19—20). — С. 307—313. Стационарный сете-