

УДК 550.34

## ТРЕХМЕРНАЯ Р-СКОРОСТНАЯ МОДЕЛЬ МАНТИИ И СЕЙСМИЧНОСТЬ ФЕННОСКАНДИИ

Т. А. Цветкова, И. В. Бугаенко, Л. Н. Заец

*Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина*

В работе проведен анализ трехмерной Р-скоростной модели мантии Фенноскандии с целью выделения связи коровых землетрясений региона и процессов в мантии. Модель мантии получена по методу Тейлорового приближения. Выявлена приуроченность коровых землетрясений Фенноскандии к межблоковым областям и наклонным слоям в верхней мантии, сверхглубинным флюидным процессам.

**Ключевые слова:** трехмерная Р-скоростная модель; Фенноскандия; мантия; землетрясения; сверхглубинные флюиды.

**T. A. Tsvetkova, I. V. Bugaenko, L. N. Zaets. THREE-DIMENSIONAL P-VELOCITY MODEL OF THE MANTLE AND SEISMICITY OF FENNOSCANDIA**

The paper analyzes the three-dimensional P-velocity model of the mantle of Fennoscandia in order to identify the connection between regional crustal earthquakes and processes in the mantle. The mantle model was obtained by the Taylor approximation method. Crustal earthquakes in Fennoscandia were found to be associated with interblock areas and inclined layers in the upper mantle, super-deep fluid processes.

**Keywords:** three-dimensional P-velocity model; Fennoscandia; mantle; earthquakes; super-deep fluids.

### **Введение**

Хорошо известно, что сейсмичность того или иного региона связывается с тектоническими и геодинамическими обстановками, характеризующими данный регион. Слабая сейсмичность платформенных областей, в том числе и щитов, давно привлекает внимание исследователей. Отмечается, что наиболее распространены коровые землетрясения, связанные с деформацией упругой среды (как эндогенного, так и экзогенного генезиса).

Согласно С. В. Богдановой [Shchipansky, Bogdanova, 1996] Фенноскандия определяется как

западная часть Восточно-Европейской платформы (ВЕП). Граница ее фундамента определяется линией Тейсейра – Торнквиста на юге, мезо-неопротерозойской системой Волыно-Оршанского и Среднерусского авлакогенов на востоке, северная и западная границы – соответствующими границами Фенноскандинавского щита. К тектоническим структурам Фенноскандии соответственно относятся Фенноскандинавский (Балтийский) щит, Балтийская моноклиналь, Балтийская синеклиза, массив Курземе, Литовский порог, Гданьская впадина, Мазуро-Белорусская антеклиза, Подляско-Брестская впадина, Центральный Польский вал.

Учитывая, что геофизические неоднородности ярче всего проявляются в распределениях скоростей сейсмических волн, актуально изучение скоростных характеристик мантии под платформами и их окружением. Хорошо известно, что докембрийские платформы определяются как стабильные регионы. Возникает вопрос, возможно ли выявить мантийные скоростные предпосылки нарушения стабильности, при том что такие явления, как сейсмичность, современные движения земной поверхности, тектонические напряжения подчеркивают современную геодинамическую активность коры либо литосферы платформ. Сейсмическая томография, как метод, выявляющий скоростные неоднородности мантии, не может до конца однозначно ответить на вопрос о стабильности платформы. Можно ожидать, что выявление основных скоростных свойств мантии под платформой, их взаимосвязи и взаимовлияния с мантией под ее окружением и, по возможности, взаимосвязи между основными скоростными слоями мантии создаст предпосылки для решения таких вопросов. Поэтому рассмотрение их является одним из наиболее важных моментов при анализе результатов решения задач сейсмической томографии.

В предыдущих статьях мы рассмотрели трехмерное скоростное строение мантии под ВЕП. Анализ скоростного строения мантии под теми или иными тектоническими регионами часто приводит к несовпадению тектонических границ с границами распространения скоростных мантийных областей и показывает необходимость учета влияния на скоростные характеристики мантии под рассматриваемым регионом скоростных характеристик мантии под окружающими регионами. Особенно ярко эта ситуация проявляется с глубиной в пределах скоростной характеристики переходной зоны верхней мантии и зоны раздела-1 между верхней и средней мантией. В работе использована модель Ю. М. и Д. Ю. Пушаровских [2010]. Специфика скоростного строения как стабильной мантии, так и активизированной определяется инверсией скоростей при переходе от одной геосферы к другой с глубиной. Как уже указывалось [Цветкова и др., 2009], послойная инверсия скоростей для мантии под ВЕП проявляется в следующем: высокоскоростная верхняя мантия, низкоскоростной слой переходной зоны, высокоскоростная зона раздела-1, низкоскоростная средняя мантия, высокоскоростная зона раздела-2, низкоскоростная нижняя мантия.

Нашей задачей является показать связь скоростного строения мантии под Фенноскандией

с наблюдающимися в настоящее время землетрясениями этого региона. Определим область исследований как (55–75°) с. ш. × (0–50°) в. д., тем самым к ней отнесены Фенноскандинавский щит и его окружение. Исходными данными для построения трехмерной Р-скоростной модели мантии являются бюллетени ISC за период с 1964 по 2006 гг. Трехмерная Р-скоростная модель мантии Фенноскандии представлена горизонтальными сечениями в истинных скоростях с шагом 25 км, долготными и широтными сечениями с шагом 1° в невязках скоростей относительно обобщенной средней скорости для мантии Евразии и ее окружения. Скоростное строение мантии Фенноскандии до глубины 1100 км представлено в работах [Цветкова и др., 2009, 2010, 2015а, б; Цветкова, Бугаенко, 2016]. Тектоническая схема представлена на рис. 1.

Полученная трехмерная Р-скоростная модель мантии Фенноскандии позволяет провести анализ соответствия основных локализаций гипоцентров землетрясений и скоростного строения мантии Фенноскандии.

Вопрос сейсмичности Фенноскандии не нов и давно привлекает внимание исследователей. В работе [Аптикаев и др., 2012] по имеющимся историческим инструментальным данным на территории Восточно-Европейской платформы приведен каталог землетрясений ВЕП за период с 1532 по 2008 годы. В данный каталог вошли землетрясения с магнитудой  $\geq 3,0$ . Анализ данного каталога показывает, что за период до 1964 г. в нем приведена информация о 36 землетрясениях интересующего нас региона. Наиболее интересные из них датируются 16–20 веками и не противоречат каталогам ISC за период 1964–2017 гг. [International..., 2017]. Информация о землетрясениях Фенноскандии приведена в работах [Юдахин, 2002; Шаров, 2017]. Согласно бюллетеням ISC за указанный период, с 1964 по 2017 гг. произошло 7627 событий, характеризующихся магнитудой  $\geq 3$  (рис. 2). Следует отметить, что большинство землетрясений коровые. Для значительной их части гипоцентры приурочены к глубинам 0 и 10 км. В работе [Шаров, 1993] выделялись при обработке сейсмических профилей коровые волноводы. Ф. Н. Юдахин [2002] отметил, что выделенные на глубинах 7–18 км волноводы соотносятся с большей частью фиксированных землетрясений.

Поскольку нашей задачей является установление взаимосвязи коровых землетрясений и скоростного строения мантии, рассмотрим несколько аспектов, которые могут приводить

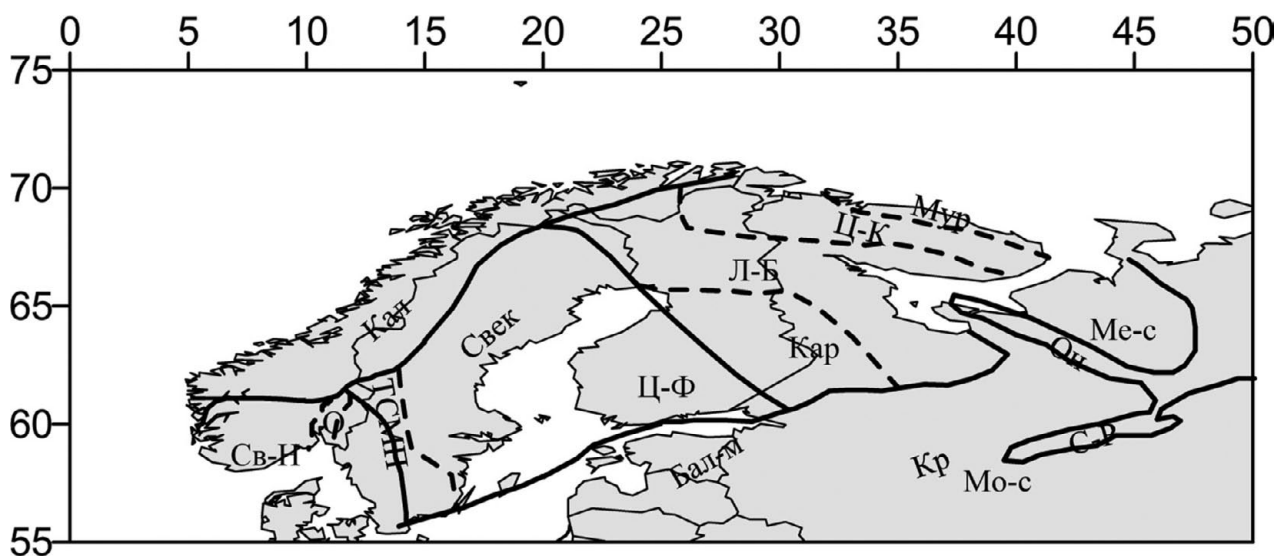


Рис. 1. Тектоническая схема исследуемой территории по В. Е. Хаину [2001] (обобщенно):

Бал-м – Балтийская моноклинал, Кал – Скандинавские каледониды, Кар – Карельский блок Кольско-Карельского мегаблока, Кр – Крестовский авлакоген, Л-Б – Лапландско-Беломорский гранито-гнейсовый пояс Кольско-Беломорского мегаблока, Мо-с – Московская синеклиза, Ме-с – Мезенская синеклиза, Мур – Мурманский блок Кольско-Карельского мегаблока, О – грабен Осло (Свеконорвежский мегаблок), Он – Онежский грабен (Кольско-Карельский мегаблок), Св-Н – Свеконорвежский мегаблок, Свек – Свекофенский мегаблок, ТСМП – Трансскандинавский магматический пояс, Ц-К – Центрально-Кольский блок (Кольско-Карельский мегаблок), Ц-Ф – Центральный Финляндский массив (Свекофенский мегаблок)

Fig. 1. Tectonic scheme of the studied area according to V. E. Khain [2001] (generalized):

Бал-м – Baltic monocline, Кал – Scandinavian Caledonides, Кар – Karelian block of the Kola-Karelian megablock, Кр – Krestovskiy avlaco-gen, Л-Б – Lapland-White Sea granite-gneiss belt of the Kola-White Sea megablock, Мо-с – Moscow syncline, Ме-с – Mezen syncline, Мур – Murmansk block of the Kola-Karelian megablock, О – Oslo graben (Sveconorwegian megablock), Он – Onega graben (Kola-Karelian megablock), Св-Н – Sveconorwegian megablock, Свек – Svecofenian megablock, ТСМП – Transscandinavian Igneous Belt, Ц-К – Central Kola block (Kola-Karelian megablock), Ц-Ф – Central Finland massif (Svecofenian megablock)

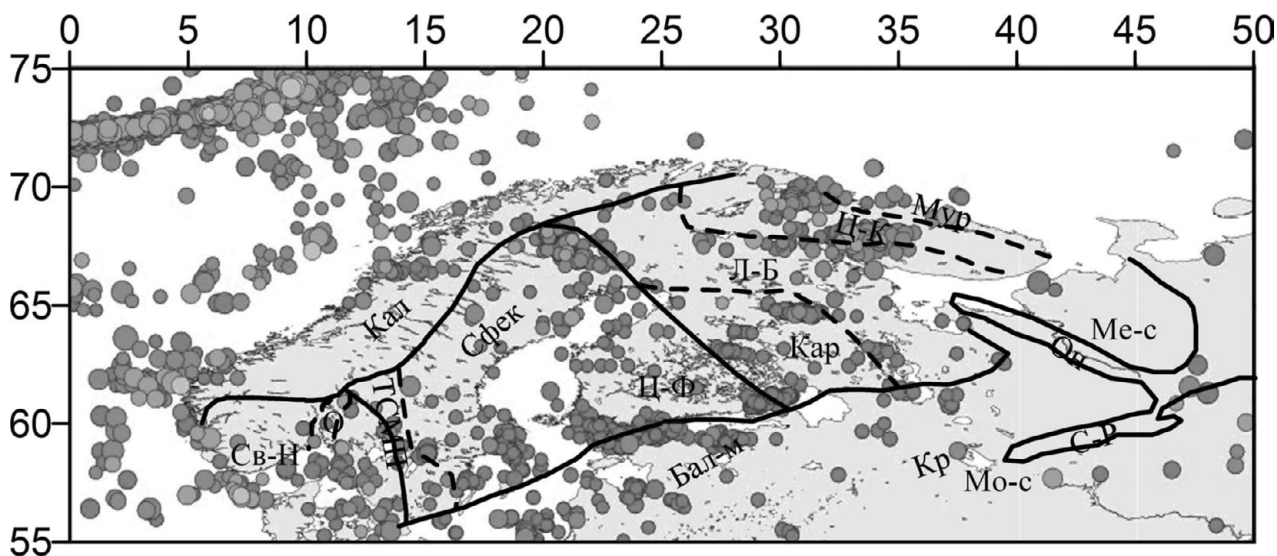


Рис. 2. Землетрясения с магнитудой  $\geq 3$  за период 1964–2017 гг. [International..., 2017]

Fig. 2. Earthquakes with magnitude  $\geq 3$  in 1964–2017 [International..., 2017]

к повышенной сейсмичности. Это прежде всего вопросы, связанные с активизацией мантии, скоростным блоковым строением мантии, проявлением наклонных высокоскоростных слоев и мантийные процессы, связанные с дегазацией Земли.

### Пограничные скоростные мантийные зоны под Фенноскандией

Рассмотрение западных мантийных пограничных зон (между высокоскоростной и низкоскоростной мантией) Восточно-Европейской

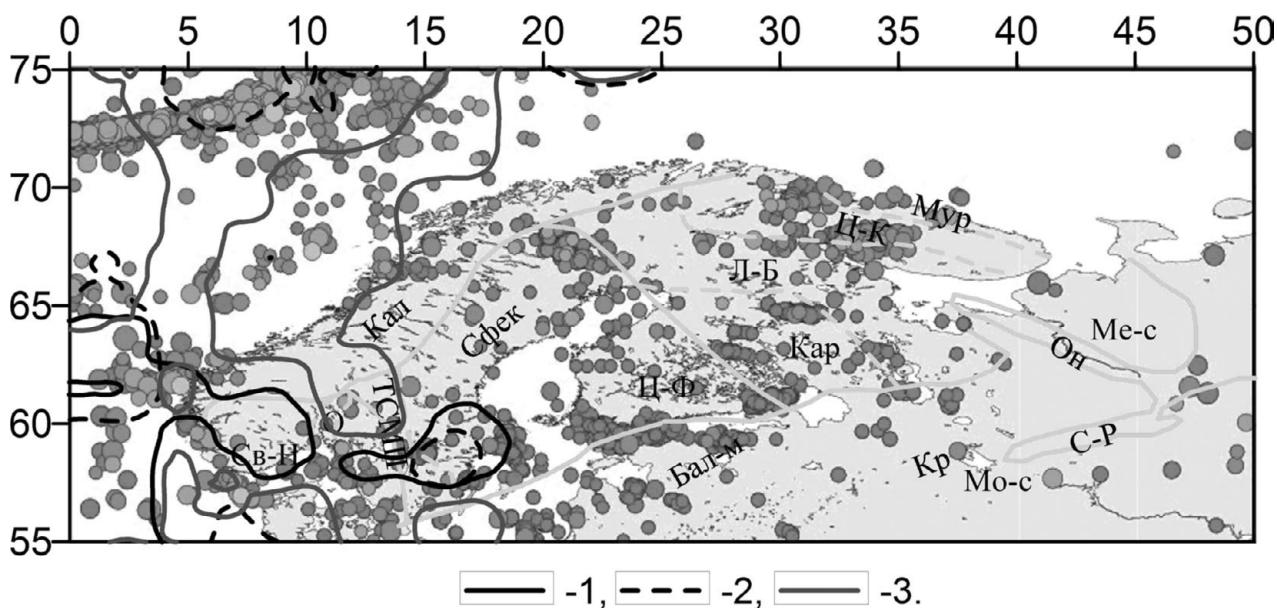


Рис. 3. Динамика распространения мантийных пограничных изолиний и землетрясения с магнитудой  $\geq 3$  (см. рис. 2):

1 – распространение пограничной изолинии на глубине 50 км, 2 – распространение пограничной изолинии на глубине 100 км, 3 – распространение пограничной изолинии на глубине 250 км

Fig. 3. Dynamics of mantle boundary isolines shift and earthquakes with magnitude  $\geq 3$  (see Fig. 2):

1 – shift of the boundary isoline at a depth of 50 km, 2 – shift of the boundary isoline at a depth of 100 km, 3 – shift of the boundary isoline at a depth of 250 km

платформы в пределах верхней мантии и ее переходной зоны [Цветкова и др., 2010] показало, что западные пограничные изолинии формируются к глубине 250 км и четко проявляются на глубинах переходного слоя верхней мантии, отражая распространение скоростных структур мантии под Атлантическим океаном в сторону мантии под ВЕП, начиная от мантии под срединно-океаническим хребтом. Наиболее четко это проявляется в северо-западной части, начиная от мантии под хребтом Книпповича. На рис. 3 и 4 показано распространение пограничных изолиний скорости, соответствующих обобщенной средней скорости (референтной) на данной глубине.

Южная пограничная изолиния показывает распространение высокоскоростных структур южного окружения мантии под Фенноскандией (мантия под ВЕП) на север-северо-восток. Пограничная изолиния огибает с юга Центральное поднятие Северного моря. Через мантию под Северо-Восточной Германской впадиной она выходит в мантию под поднятием Ринг-Кюбинг-Фюн, далее по мантии под грабенем Осло проходит до мантии под западной частью Транскаandinавской магматической зоны, продолжается под ее восточной частью до середины, где поворачивает на восток, огибая с севера массив Свекофенид Свеаленда Свекофенн-

ского мегаблока. Далее распространяется через мантию под Балтийским морем, севернее о. Готланд, и выходит в мантию под Балтийской синеклизой южнее массива Курземе, поворачивает на восток и доходит до Волыно-Оршанского авлакогена (Оршанской впадины). Такое распространение пограничных изолиний показывает активизацию юго-западной и северо-западной частей мантии Фенноскандии. Рассмотрение мантийных пограничных зон ВЕП показало их несоответствие с тектоническими границами [Цветкова и др., 2010].

### Блоковое строение мантии Фенноскандии

Трехмерная Р-скоростная модель мантии под Фенноскандией позволила построить блоковую делимость мантии на глубинах до 300 км включительно [Цветкова и др., 2010] (рис. 5). Следует отметить отсутствие противоречий между блоковым строением коры, полученным М. В. Юдахиным [2002], и блоковым строением мантии Фенноскандии. Землетрясения могут ассоциироваться с процессами, связанными с межблоковыми зонами. Сравнение между блоковым строением мантии и расположением эпицентров землетрясений подтверждает приуроченность последних к межблоковым зонам (см. рис. 5). Основные границы делимости



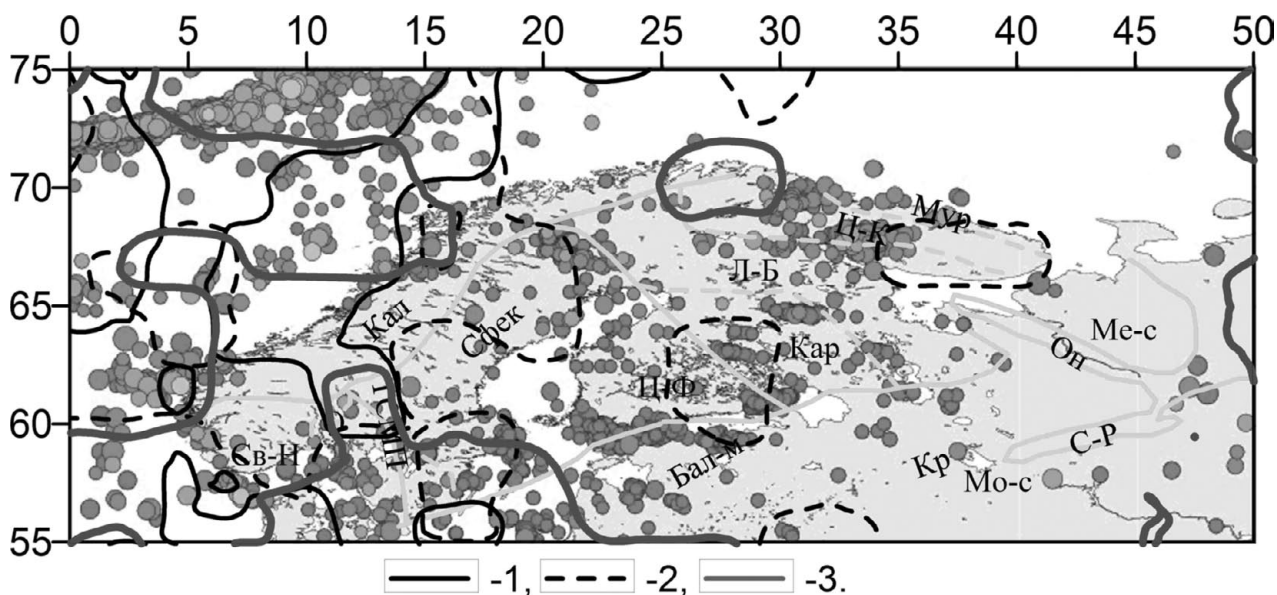


Рис. 4. Динамика распространения мантийных пограничных изолиний и землетрясения с магнитудой  $\geq 3$  (см. рис. 2):

1 – распространение пограничной изолинии на глубине 250 км, 2 – распространение пограничной изолинии на глубине 400 км, 3 – распространение пограничной изолинии на глубине 500 км

Fig. 4. Dynamics of mantle boundary isolines shift and earthquakes with magnitude  $\geq 3$  (see Fig. 2):

1 – shift of the boundary isoline at a depth of 250 km, 2 – shift of the boundary isoline at a depth of 400 km, 3 – shift of the boundary isoline at a depth of 500 km

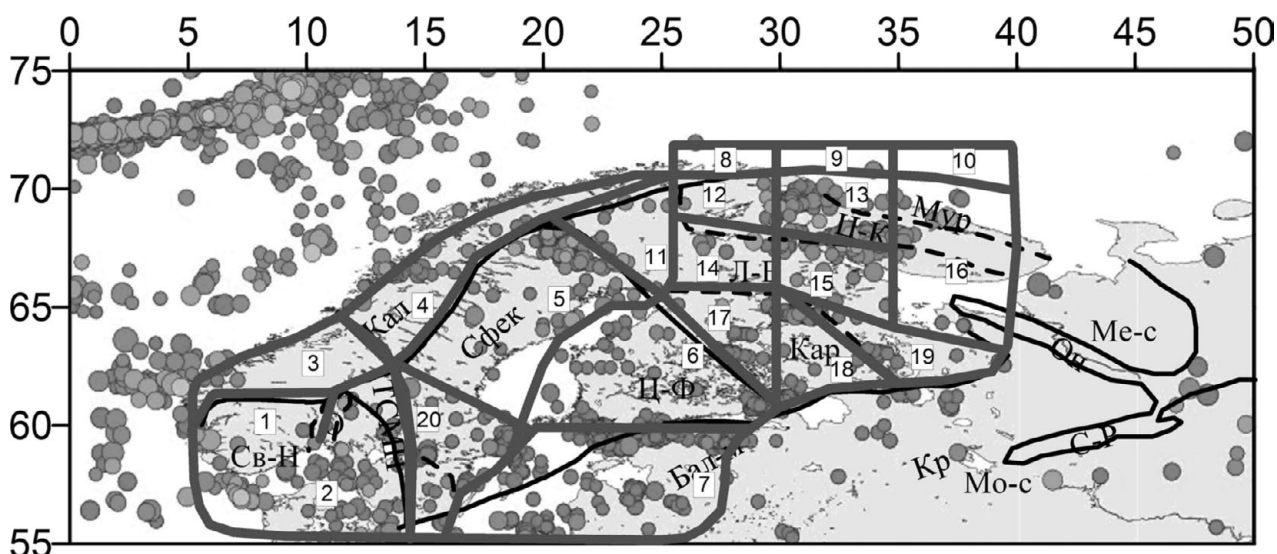


Рис. 5. Блочное строение мантии Фенноскандии [из: Цветкова и др., 2010] и землетрясения с магнитудой  $\geq 3$  (см. рис. 2)

Fig. 5. Block structure of the Fennoscandian mantle [after: Tsvetkova et al., 2010] and earthquakes with magnitude  $\geq 3$  (see Fig. 2)

мантии под Фенноскандией (рис. 5) определены общими скоростными мантийными характеристиками и согласованы как по горизонтальным, так и по вертикальным сечениям. Скоростная блоковость мантии представлена следующими блоками.

1) FSCHW, объединяет подблоки 5 + 11, определяется частью мантии под севером

Скандинавских каледонид, основной частью Свекофеннского мегаблока (а именно мантийной областью под южной частью района Норботтен и северной частью геосинклинальной зоны Центрального Норланда), западной частью Лапландско-Беломорского пояса Кольско-Карельского мегаблока, ограниченной с востока Гранулитовым поясом, включающей ман-

тийные области под Лапландским массивом, основной частью района Норботтен.

2) FScHE, объединяет подблоки 9 + 10 + 13 + 15 + 16 + 17 + 18 + 19, соответствует мантии под Кольско-Карельским мегаблоком, исключая центральную часть Лапландско-Беломорского пояса и запад Центрально-Кольского блока. Восточная мантийная скоростная граница блока соответствует разделу между мантией под Фенноскандией и мантийными скоростными структурами основной части ВЕП.

3) FScL, характеризуется более низкими на общем высокоскоростном фоне скоростями. Он делится на три подобласти:

3.1) FScL1 (подблок 7), включает области под Балтийской синеклизой (в пределах от массива Курземе до Гданьской депрессии включительно) с выходом до мантии под линией Тейсейра – Торнквиста в районе Центрального Польского вала;

3.2) FScL2, соответствует объединению подблоков 6 + 8 + 12 + 14 + 17 + 20, включает подобласти FScL21 (мантия под Центральным Финляндским массивом и его окружением) и FScL22, имеющую юго-восток – северо-западное простирание, соответствующее южной части Свекофеннского мегаблока (мантия под южной частью Центральной геосинклинальной зоной Норланда, свекофенидами Свеаленда, районом гранитов Смоланда, Трансскандинавской магматической зоной) с выходом под южной частью Скандинавских каледонид в мантию под Норвежским морем в сторону плато Вёринг;

3.3) FScL3, соответствует объединению подблоков 1 + 2 (мантия под Свеко-Норвежским мегаблоком).

4) FScBN, выделяется как более низкоскоростная южная пограничная структура (мантия под Центральным Польским валом, Львовско-Люблинской депрессией до Волыно-Оршанского авлакогена), формирующаяся под влиянием Карпато-Балканского региона и фанерозойской Европы.

5) Высокоскоростной блок FScHS, является промежуточным между южной пограничной зоной FScBN и низкоскоростной зоной FScL.

Блоки FScBN и FScHS не входят в представленную на рис. 5 область.

Таким образом, по скоростным характеристикам верхней мантии происходит выделение высокоскоростных блоков мантии под Фенноскандией – FScHW, FScHE, FScHS, разделенных между собой более низкоскоростным блоком FScL. Наиболее высокоскоростным на этой глубине является блок FScHE, отвечающий мантии под Кольско-Карельским мегаблоком.

Более низкоскоростная южная пограничная зона FScBN испытывает влияние мантийных скоростных структур как фанерозойской Европы, так и Карпато-Балканского региона.

### **Высокоскоростные наклонные слои**

Особый интерес при рассмотрении вопросов сейсмичности представляют наклонные слои (рис. 6). В работе [Цветкова и др., 2010] наклонные слои были рассмотрены более детально. Обращает на себя внимание выделение двух типов наклонных слоев: 1) распространение в литосфере на глубинах 50–250 км более высокоскоростных слоев в менее высокоскоростные, а не только в низкоскоростные; 2) наклонные слои, проходящие через верхнюю мантию и ее переходную зону.

Высокоскоростные наклонные слои (рис. 6) выделяют области под Дальсландской, западной частью Свекофеннской и Кольско-Лапландско-Беломорской провинциями. Раздел Кольско-Лапландско-Беломорской провинции на восточную и западную части связывается с окончанием наклонных слоев, распространяющихся с запада на восток.

Наклонные высокоскоростные слои подчеркивают выделенные, как активизированные, пограничные северо-западную и юго-западную части исследуемой области. В то же время юго-западная область включает наклонные слои, распространяющиеся как с востока на запад, так и с запада на восток. Раздел на западную и восточную части определяется Трансскандинавской магматической зоной. Наклонные высокоскоростные слои, распространяющиеся с севера на юг, относятся в основном к Дальсландской провинции.

### **Сверхглубинные мантийные флюиды**

Отметим, что как плюмовые процессы, так и сверхглубинные мантийные флюиды соотносятся с процессами дегазации Земли. В работе [Цветкова и др., 2015б] была рассмотрена сейсмическая визуализация проявления плюмов и сверхглубинных флюидных процессов рассматриваемого региона. Их расположение показано на рис. 7. Обращает на себя внимание приуроченность скоплений землетрясений к областям флюидных доменов (области растекания плюмов). Напомним, что в мантии под Фенноскандией выделяются скоростные области, основной особенностью которых является распространение низкоскоростного субвертикального слоя из средней мантии через зону раздела-1 [по: Пуцаровский, Пуцаровский,

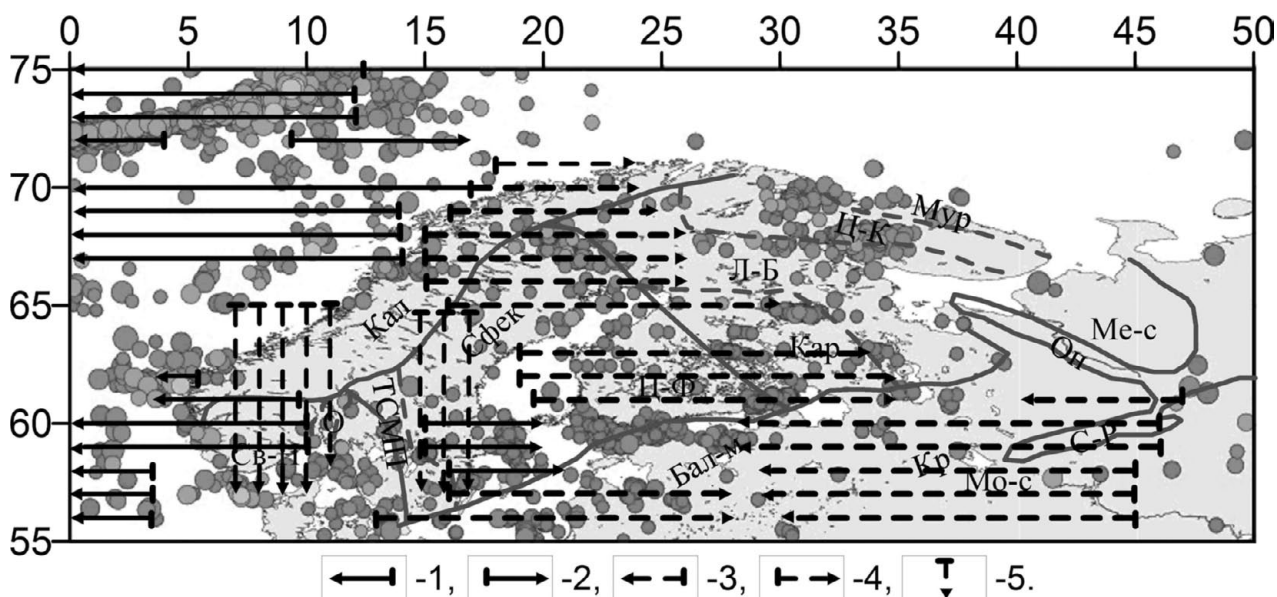


Рис. 6. Наклонные верхнемантийные слои исследуемой территории и землетрясения с магнитудой  $\geq 3$  (см. рис. 2):

1 – распространение в западном направлении высокоскоростного слоя (указана проекция на дневную поверхность начала и конца погружения), 2 – распространение в восточном направлении высокоскоростного слоя (указана проекция на дневную поверхность начала и конца погружения), 3 – распространение в западном направлении в высокоскоростной верхней мантии более высокоскоростного слоя (указана проекция на дневную поверхность начала и конца погружения), 4 – распространение в восточном направлении в высокоскоростной верхней мантии более высокоскоростного слоя (указана проекция на дневную поверхность начала и конца погружения), 5 – распространение в южном направлении в высокоскоростной верхней мантии более высокоскоростного слоя (указана проекция на дневную поверхность начала и конца погружения)

Fig. 6. Inclined upper mantle layers of the studied area and earthquakes with magnitude  $\geq 3$  (see Fig. 2):

1 – westward shift of the high-velocity layer (the projection of the start and end of the plunge on the daylight surface is shown), 2 – eastward shift of the high-velocity layer (the projection of the start and end of the plunge on the daylight surface is shown), 3 – westward shift of a higher velocity layer in the high-velocity upper mantle (the projection of the start and end of the plunge on the daylight surface is shown), 4 – eastward shift of a higher velocity layer in the high-velocity upper mantle (the projection of the start and end of the plunge on the daylight surface is shown), 5 – southward shift of a higher velocity layer in the high-velocity upper mantle (the projection of the start and end of the plunge on the daylight surface is shown)

2010] в переходную зону верхней мантии и, как следствие этого, специфика скоростной слоистости верхней мантии и переходной зоны верхней мантии. Выходы пониженных скоростей из нижней, средней мантии в верхнюю, возможно вплоть до коры включительно, с последующим их «растеканием» будем называть доменами (ФД) [Цветкова и др., 2015б]. Представления по долготным и широтным сечениям показывают, что землетрясения, относящиеся к Хибинскому скоплению землетрясений, относятся к западной области растекания Беломорского плюма, а именно к области, объединяющей часть Лапландского массива, где выделяется сверхглубинный флюид, и западное окончание Беломорского плюма. Указанные области занимают большую часть территории Фенноскандинавского щита, включая Прибалтийский мантийный блок. Входящие в основную часть области Беломорского, Варангер и Шеллефтео затухающих либо затухших плюмов не отвечают непосредственному проявлению

землетрясений (рис. 7). В областях растекания перечисленных плюмов четко выделяются сверхглубинные флюидные процессы, проявляющиеся как субвертикальные колонки чередования повышенных и пониженных скоростей. Таким областям соответствуют скопления землетрясений (рис. 7). Мы не рассматриваем Вольно-Оршанский флюидный домен, влияние которого может захватывать южную пограничную часть мантии. Области проявления сверхглубинных флюидов следующие: грабен Осло, сверхглубинные флюиды Центрально-Финляндского массива, Балтийская моноклиналь, Ладожская структура, Карельский массив, Онежский массив, Кандалакшский массив, Хибинский плутон, Варангер-фьорд, массив Норботтен и т. д. (рис. 8).

Присутствие в мантии под рассматриваемым регионом относительно значительного количества сверхглубинных флюидных процессов позволяет ожидать наличие флюидов в коре и активизацию сейсмических процессов как



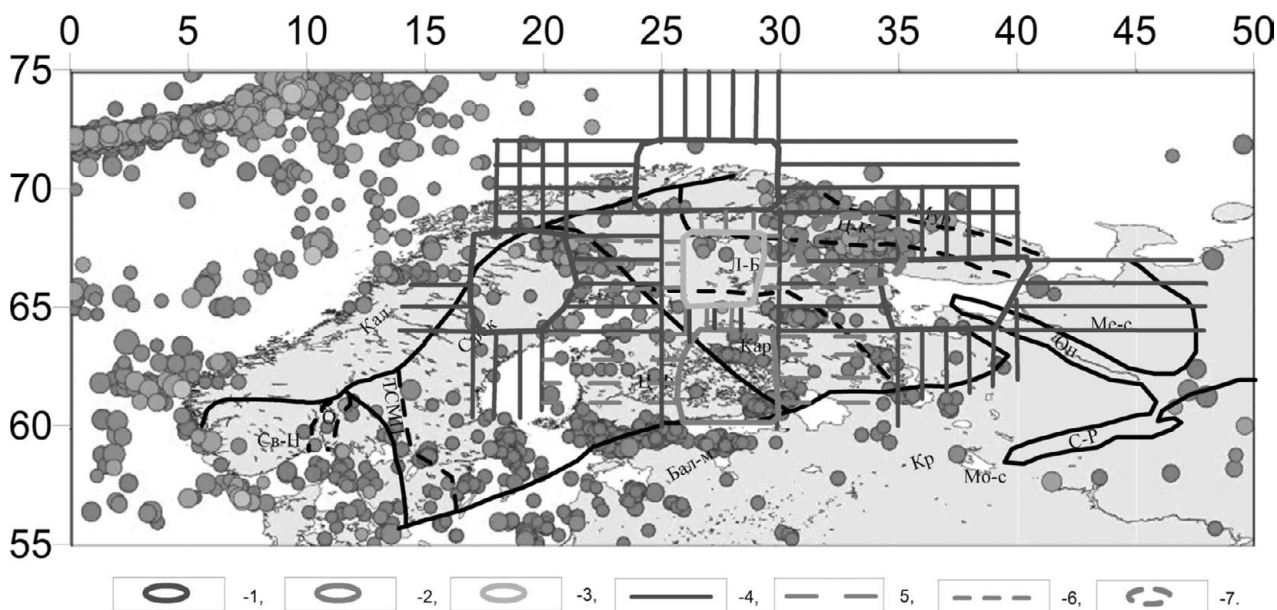


Рис. 7. Области растекания мантийных доменов:

1 – Беломорский, Варангер, Шеллефтео, 2 – Костомукша, 3 – Лапландский верхнемантийный домен, 4 – направления растекания со стороны доменов Беломорского, Варангер и Шеллефтео, 5 – направления растекания со стороны Костомукши, 6 – направления растекания со стороны Лапландского верхнемантийного домена, 7 – предполагаемый рельеф Карело-Кольской щелочной провинции [Богатиков и др., 2010]

Fig. 7. Areas of mantle domains spreading:

1 – White Sea, Varanger, Shellefteo, 2 – Kostomuksha, 3 – Lapland upper mantle domain, 4 – directions of spreading from White Sea, Varanger, Shellefteo domains, 5 – directions of spreading from Kostomuksha, 6 – directions of spreading from the Lapland upper mantle domain, 7 – estimated relief of the Karelia-Kola alkaline province [Bogatikov et al., 2010]

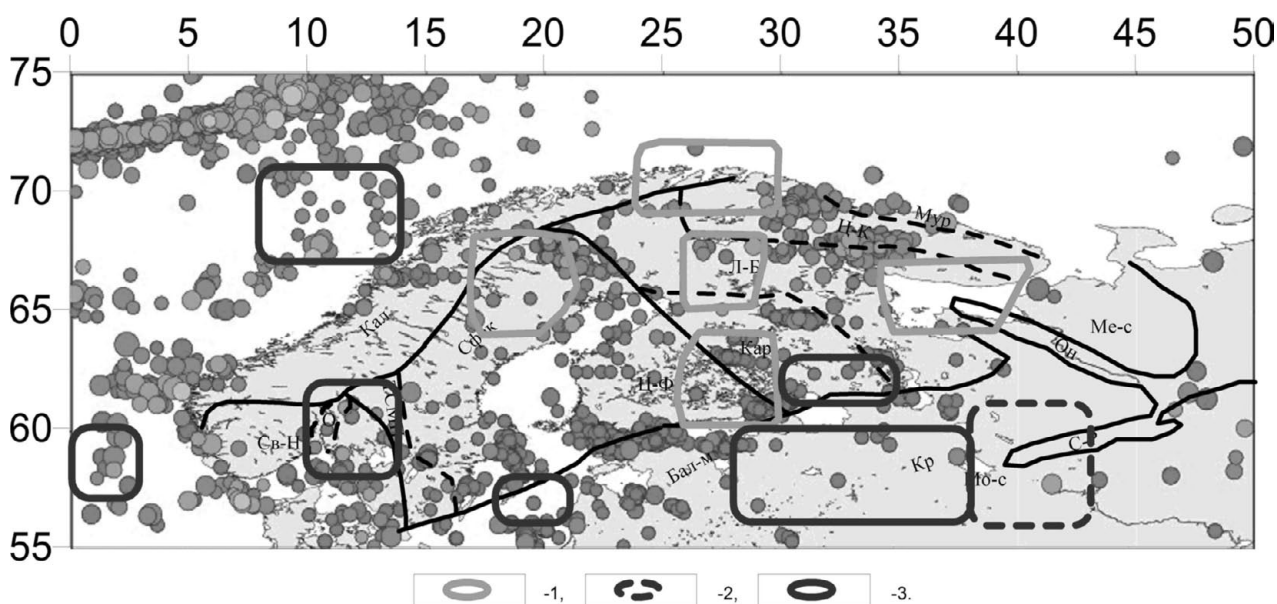


Рис. 8. Центральные части мантийных доменов и сверхглубинные флюиды исследуемой территории:

1 – флюидные домены Беломорский, Варангер, Шеллефтео, Лапландский верхнемантийный домен, Костомукша (см. рис. 7), 2 – центральная часть Московского флюидного домена, 3 – сверхглубинные флюиды

Fig. 8. Central parts of mantle domains and extra-deep fluids of the studied area:

1 – White Sea, Varanger, Shellefteo fluid domains, Lapland upper mantle domain, Kostomuksha (see Fig. 7), 2 – central part of the Moscow fluid domain, 3 – extra-deep fluids

следствие этого. В работе [Шаров, Свириденко, 2017] и др. приведены известные для Фен-

носкандии флюиды:  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ . Области, обладающие в совокупности указанными свой-



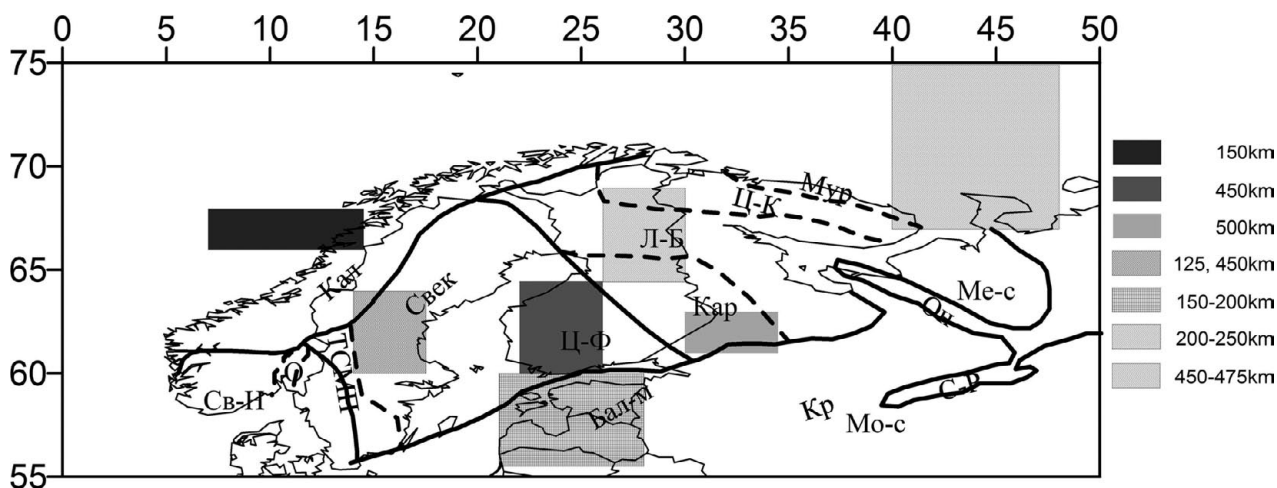


Рис. 9. Возможные волноводы в мантии под Фенноскандией [из: Цветкова, Бугаенко, 2016]

Fig. 9. Possible low-velocity interbedded layers in the mantle under Fennoscandia after: [Tsvetkova, Bugaenko, 2016]

ствами (а именно: присутствие флюидов, выделенные волноводы, как в коре [Шаров, 1993], так и в мантии [Цветкова, Бугаенко, 2016], выделенные области повышенной электропроводности [Burakhovich et al., 2015]), характеризуются повышенной сейсмичностью [Калинин и др., 1989; Гуфельд, 2007; Родкин и др., 2009].

В работах [Шаров, 1993; Шаров, Свириденко, 2017] проведен анализ скоростного строения коры Фенноскандинавского щита по данным выполненных ГСЗ, ОГТ, КМПВ и т. д., который показал присутствие коровых волноводов на глубинах 7–18 км. В работе [Юдахин, 2002] при анализе сейсмичности обращалось внимание на выделение волноводов в коре Балтийского (Фенноскандинавского) щита. Анализ скоростного строения мантии под исследуемой областью [Цветкова, Бугаенко, 2016] позволил выделить возможные волноводы (рис. 9). Последние выделяются согласно полученной трехмерной Р-скоростной модели скорости для мантии под Евразией и ее окружением как следствие уменьшения конечно-разностного градиента скорости от значений  $\leq 0,015$  км/сек. Отсюда следует приуроченность выделенных возможных мантийных волноводов к местам проявления сверхглубинных флюидов, что соответствует представлению сверхглубинных мантийных флюидов как чередования областей повышенных и пониженных скоростей. Обратим внимание на то, что в работе [Burakhovich et al., 2015] представлены коровые области территории ВЕП, которым соответствует высокая электропроводность. Тогда областям проявления скопления землетрясений соответствуют сверхглубинные флюидные процессы, волноводы, как коровые, так и мантийные, высокая электропроводность. Сверхглубинным

флюидным процессам соответствуют процессы сжатия-растяжения [Летников, 1999], приводящие к твердотельным преобразованиям при распространении флюидов вверх [Родкин и др., 2009]. Особо необходимо отметить роль волноводов. Согласно [Павленкова, Павленкова, 2014], волноводы соответствуют накоплению как флюидов, так и энергии, передающейся с флюидами. В соответствии с полученной трехмерной Р-скоростной моделью, выделенными согласно ей сверхглубинными флюидами, значительная часть землетрясений, наблюдаемых на рассматриваемой территории, имеют флюидный генезис. Рассмотрим более детально землетрясения Хибинского плутона.

### Землетрясения Хибин

Хибинский плутон относится к Кольско-Карельскому мегаблоку. Мантия под Хибинским плутоном, (67–68°) с. ш. × (33–34°) в. д., относится к западной зоне растекания Беломорского плюма [Цветкова и др., 2015б]. Область скопления землетрясений несколько шире и соответствует западной области растекания Беломорского плюма и включает непосредственно область Хибинского плутона и ее окружение, (67–68°) с. ш. × (30–35°) в. д. В промежутке 2010–2017 гг. здесь произошло 67 событий, все коровые. Максимальная магнитуда составила 4,0–4,5 и относится к событиям 21 октября 2010 г., 67.5702° с. ш. × 33.7890° в. д.,  $M_g = 4,0$ , и 3 июня 2011 г., 67.6560° с. ш. × 33.7370° в. д.,  $M_g = 4,5$ . Последнее землетрясение произошло 9.03.2018 г. Магнитуда определена как 3,3. Как правило, землетрясения Хибин считаются техногенными. Рассмотрим более детально скоростное строение мантии

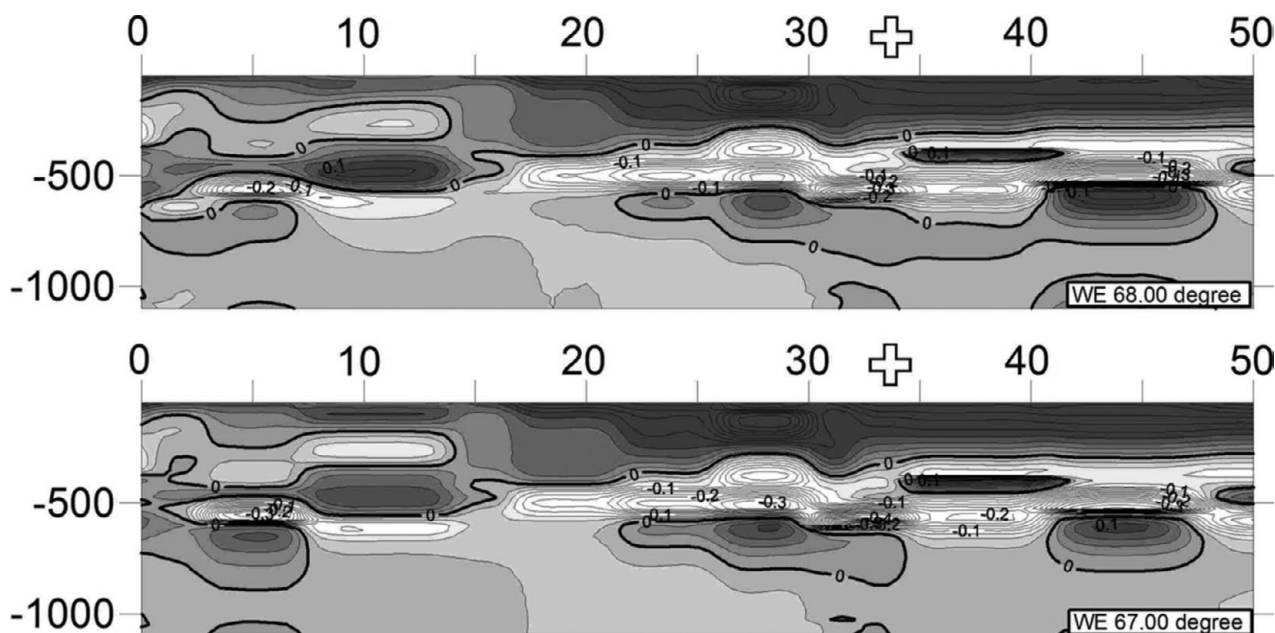


Рис. 10. Широтные сечения 67 и 68° с. ш. до глубины 1100 км трехмерной P-скоростной модели мантии. Здесь и на рис. 11 область Хибин отмечена знаком плюс

Fig. 10. Latitudinal sections at 67 and 68° n. l. up to a depth of 1100 km of the three-dimensional P-velocity model of the mantle. Here and in Fig. 11 the area of the Khibiny Massif is marked with a plus sign

рассматриваемого региона. События определяются в контактной мантийной области между Лапландским сверхглубинным флюидом и Беломорским плюмом (рис. 8, 9). Лапландский сверхглубинный флюид также относится к южному растеканию Варангер-плюма и западному растеканию Беломорского плюма (рис. 10, 11). В работе [Цветкова и др., 2015б] детально представлены скоростные характеристики Беломорского плюма и Варангер-плюма, областей их растекания. Обращает на себя внимание субвертикальная скоростная колонка Лапландского сверхглубинного флюида (чередование областей с повышенными и пониженными скоростями). Как отмечалось выше, согласно [Павленкова, 2001; Гуфельд, 2007] такое представление соответствует флюидному процессу. При этом мы не оговариваем тип флюида (газовый или водный). В работе [Шаров, Свириденко, 2017] и других подтверждается присутствие флюидов в коре рассматриваемой нами области. Трехмерная P-скоростная модель мантии под Фенноскандией позволила получить области возможных волноводов (рис. 9).

Полученное представление показывает классическое присутствие волновода в коре, относящееся к границе литосфера-астеносфера [Шаров, 1993; Цветкова, Бугаенко, 2016] и подтвержденное повышенным геоэлектрическим сопротивлением в указанной области [Астапенко, 2010; Burakhovich et al., 2015].

На рис. 10 и 11 представлены соответственно широтные и долготные сечения, при этом область скопления землетрясений определяется как (67–68°) с. ш. × (30–35°) в. д. (рис. 2). Представления по долготным и широтным сечениям показывают, что землетрясения, относящиеся к Хибинскому скоплению землетрясений, приурочены к западной области растекания Беломорского плюма, а именно к объединяющей части Лапландского массива, где выделяется сверхглубинный флюид, и западное окончание центральной части Беломорского плюма.

Широтные и долготные сечения показывают визуализацию возможного проявления сверхглубинного флюидного и плюмового процессов, с которыми связана возможная передача флюидов от мантии к коре. Глубины залегания сейсмических границ в пределах верхней мантии и переходной зоны, соответствующих этому процессу, следующие [Цветкова, Бугаенко, 2016]:

- 1) Затухший Беломорский плюм: 50, 200, 400, 450 и 625 км;
- 2) Лапландский сверхглубинный флюид: 50, 100, 200, 250, 425, 450 и 575 км.

Для Лапландского сверхглубинного флюида интервал 200–250 км соответствует возможному волноводу. По сравнению с мантией Лапландского сверхглубинного флюида мантия затухшего Беломорского плюма менее расслоена. В то же время граница залегания подошвы переходной зоны как в первом, так и во втором

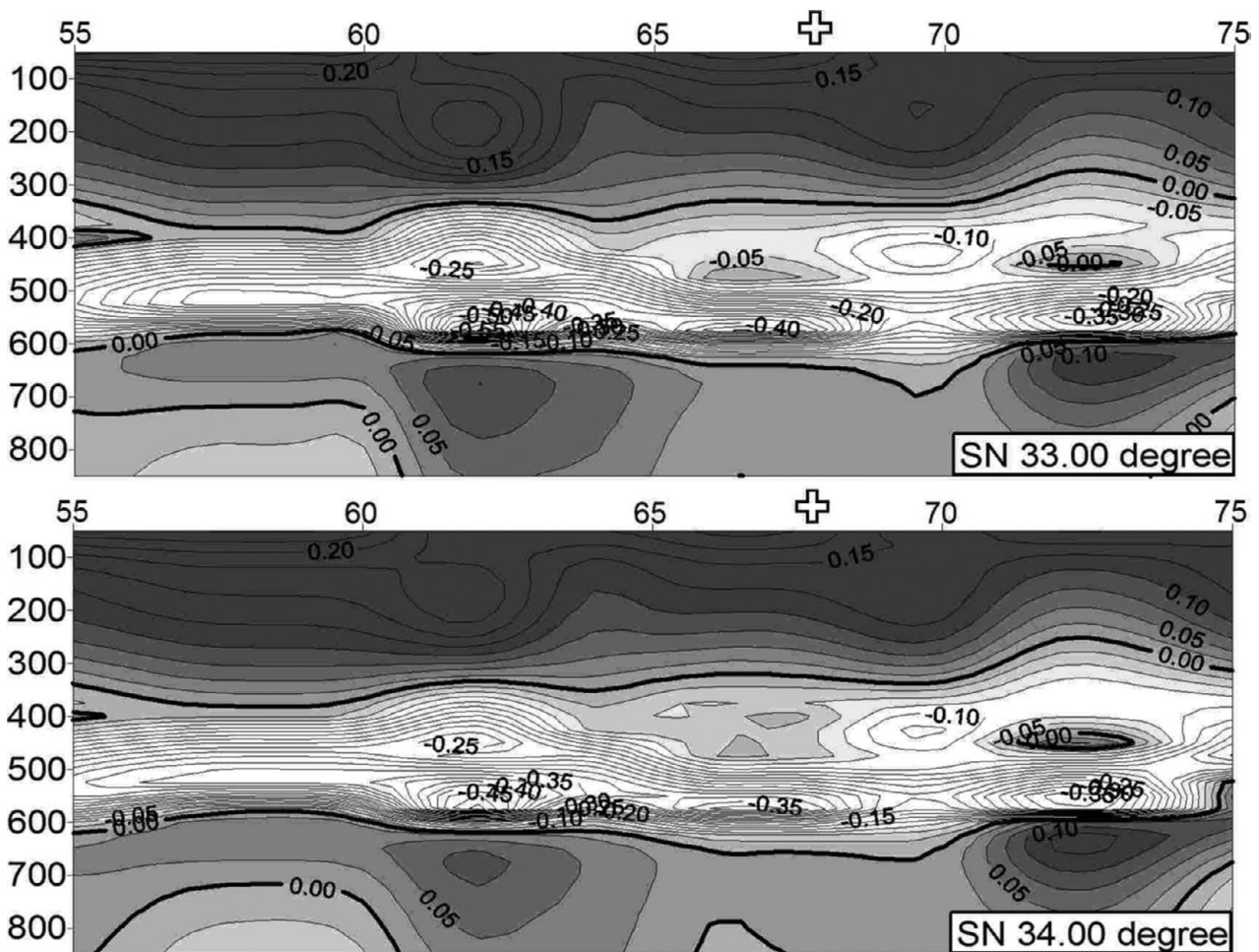


Рис. 11. Долготные сечения 33 и 34° в. д. до глубины 850 км трехмерной Р-скоростной модели мантии  
 Fig. 11. Longitudinal sections at 33 and 34° e. l. up to a depth of 850 km of the three-dimensional P-velocity model of the mantle

случае  $\leq 650$  км, что дает основание представлять флюидный поток. В первом случае – 625 км, во втором – 575 км.

Как отмечалось выше, сейсмичность среды может быть определена присутствием флюидов, волноводов и повышенным геоэлектрическим сопротивлением. Согласно [Родкин, Рундквист, 2017], с увеличением глубин землетрясений от поверхности до 70 км тенденция развития очага вверх становится все сильнее. В диапазонах глубин 0–15, 15–40 и 40–70 км с ростом глубины все более важной становится роль высоконапорных флюидов. А в диапазонах еще больших глубин – 70–250, 250–450 и 450–700 км – роль высоконапорного флюида постепенно ослабевает.

Сопоставление областей скопления землетрясений на Фенноскандинавском щите и его окружении с локализацией сверхглубинных флюидных процессов, выделенных возможных волноводов как в коре, так и в мантии, проявления областей повышенного геоэлектрическо-

го сопротивления показывает, что основными причинами землетрясений Фенноскандии являются процесс дегазации Земли и связанные с ним сверхглубинные флюидные процессы, наклонные слои.

### Выводы

Анализ трехмерной Р-скоростной модели мантии под Фенноскандинавским щитом и его окружением показал связь землетрясений со скоростной моделью мантии. Она проявляется в следующем:

- 1) в приуроченности скоплений землетрясений к межблоковым разделам при блоковом скоростном мантийном строении щита;
- 2) в наклонных слоях, распространяющихся на северо-западе Кольско-Лапландско-Беломорской провинции, в южной части Дальсландской провинции;
- 3) в процессах дегазации Земли, проявляющихся в плюмовых процессах и в сверхглу-



бинных флюидных процессах. Учитывая затухание выделенных плюмов (Беломорский, Варангер, Шеллефтео), следует отметить, что для данных областей землетрясения уже отсутствуют. Локализация скопления землетрясений соответствует проявлению сверхглубинных флюидных процессов.

## Литература

Аптикаев С. Ф., Мирмович Э. Г., Рузайкин А. И. Реальная сейсмическая активность Восточно-Европейской платформы как основа ее прогнозирования // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2012. № 2. С. 12–21.

Астапенко В. Н. Зоны повышенной электропроводимости верхней мантии Восточно-Европейской платформы // Докл. НАН Беларуси. 2010. Т. 54, № 5. С. 100–104.

Богатиков О. А., Коваленко В. И., Шарков Е. В. Магматизм. Тектоника. Геодинамика Земли. М.: Наука, 2010. 607 с.

Гуфельд И. Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. Королев: ЦНИИМаш, 2007. 152 с.

Калинин В. А., Родкин М. В., Томашевская Т. С. Геодинамические эффекты физико-химических превращений в твердой среде. М.: Наука, 1989. 144 с.

Летников Ф. А. Флюидные фации континентальной среды и проблемы рудообразования. Смирновский сборник. М.: МГУ, 1999. С. 63–95.

Павленкова Н. И. Структура земной коры и верхней мантии и механизм движения глубинного вещества // Вестник ОГГГН РАН. 2001. № 4(19). 18 с.

Павленкова Н. И., Павленкова Г. А. Строение земной коры и верхней мантии Северной Евразии по данным сейсмического профилирования с ядерными взрывами. М.: Геокарт. Геос, 2014. 192 с.

Пуцаровский Ю. М., Пуцаровский Д. Ю. Геология мантии Земли. М.: Геос, 2010. 138 с.

Родкин М. В., Никитин А. Н., Васин Р. Н. Сейсмико-тектонические эффекты твердофазных превращений в геоматериалах. М.: Геос, 2009. 198 с.

Родкин М. В., Рундквист Д. В. Геофлюидогеодинамика, приложение к сейсмологии, тектонике, процессам рудо- и нефтегенеза. Долгопрудный: Интеллект, 2017. 287 с.

Хаин В. Е. Тектоника континентов и океанов. М.: Научный мир, 2001. 604 с.

Цветкова Т. А., Шумлянская Л. А., Бугаенко И. В., Заец Л. Н. Сейсмотомография Восточно-Европейской платформы: трехмерная Р-скоростная модель мантии под Фенноскандией – 1 // Геофиз. журн. 2009. Т. 31, № 1. С. 53–72.

Цветкова Т. А., Шумлянская Л. А., Бугаенко И. В., Заец Л. Н. Сейсмотомография Восточно-Европейской платформы: трехмерная Р-скоростная модель мантии под Фенноскандией – 2 // Геофиз. журн. 2010. Т. 32, № 1. С. 60–77.

Цветкова Т. А., Бугаенко И. В., Заец Л. Н. Трехмерная Р-скоростная модель мантии Фенноскандии. Saarbrücken (Deutschland): LAP LAMBERT Academic Publ., 2015a. 138 с.

Цветкова Т. А., Бугаенко И. В., Заец Л. Н. Структура низкоскоростных областей в мантии Северной Европы // Труды КарНЦ РАН. 2015б. № 7. С. 106–126. doi: 10.17076/geo157

Цветкова Т. А., Бугаенко И. В. Структура скоростной этажности мантии под Фенноскандией по данным сейсмотомографии // Геофиз. журн. 2016. Т. 38, № 1. С. 57–77.

Шаров Н. В. Литосфера Балтийского щита по сейсмическим данным. Апатиты: КНЦ РАН, 1993. 141 с.

Шаров Н. В. Литосфера Северной Европы по сейсмическим данным. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. 168 с.

Шаров Н. В., Свириденко Л. П. Эволюция литосферы Фенноскандинавского щита в докембрии // Геофиз. журн. 2017. Т. 39, № 5. С. 47–62.

Юдахин Ф. Н. Геодинамические процессы в земной коре и сейсмичность континентальной части Европейского Севера // Литосфера. 2002. № 2. С. 3–23.

Burakhovich T. K., Kushnir A. N., Tsvetkova T. O. Recent research of geophysical parameters of the lithosphere of the East-European platform // Геодинамика. 2015. № 2(15). С. 112–114.

International Seismological Centre [Электронный ресурс]. 2017. URL: <http://www.isc.ac.uk> (дата обращения: 28.12.2017).

Shchipansky A., Bogdanova S. V. The Sarmatian crustal segment: Precambrian correlation between the Voronezh Massif and the Ukrainian Shield across the Dniepr-Donets aulocogen // Tectonophysics. 1996. No. 268. P. 109–125.

Поступила в редакцию 07.05.2018

## References

Aptikaev S. F., Mirmovich E. G., Ruzaiкин A. I. Real'naya seismicheskaya aktivnost' Vostochno-Europeiskoi platformy kak osnova ee prognozirovaniya [Real seismic activity of the East European Platform as a base of its forecasting]. *Nauch. i obrazovat. probl. grazhdanskoj zashchity* [Scientific and educational problems of civil protection]. 2012. No. 2. P. 12–21.

Astapenko V. N. Zony povyshennoi elektroprovodimosti verkhnei mantii Vostochno-Europeiskoi platformy [Zones of excessive electrical conductivity of the upper

mantle of the East European Platform]. *Dokl. NAN Belarusi* [Proceed. National Acad. of Sci. of Belarus]. 2010. Vol. 54, no. 5. P. 100–104.

Bogatikov O. A., Kovalenko V. I., Sharkov E. V. Magmatizm. Tektonika. Geodinamika Zemli [Magmatism. Tectonics. Geodynamics of the Earth]. Moscow: Nauka, 2010. 607 p.

Gufel'd I. L. Seismicheskii protsess. Fiziko-khimicheskie aspekty [Seismic process. Physical and chemical aspects]. Korolev: TsNIIMash, 2007. 152 p.

Kalinin V. A., Rodkin M. V., Tomashevskaya T. S. Geodinamicheskie efekty fiziko-khimicheskikh prevrashchenii v tverdoi srede [Geodynamical effects of physico-chemical transformations in the solid medium]. Moscow: Nauka, 1989. 144 p.

Khain V. E. Tektonika kontinentov i okeanov [Tectonics of continents and oceans]. Moscow: Nauchnyi mir, 2001. 604 p.

Letnikov F. A. Flyuidnye fatsii kontinental'noi sredy i problemy rudoobrazovaniya. Smirnovskii sbornik [Fluid facies of the continental medium and problems of ore formation. Smirnov collection]. Moscow: MGU, 1999. P. 63–95.

Pavlenkova N. I. Struktura zemnoi kory i verkhnei mantii i mekhanizm dvizheniya glubinnogo veshchestva [The structure of the Earth's crust and upper mantle and the mechanism of deep-laid matter movement]. Vestnik OGGGN RAN [Vestnik of the Dep. of Geol., Geophysics, Geochem., and Mining Sci. RAS]. 2001. No. 4(19). 18 p.

Pavlenkova N. I., Pavlenkova G. A. Stroenie zemnoi kory i verkhnei mantii Severnoi Evrazii po dannym seismicheskogo profilirovaniya s yadernymi vzryvami [The structure of the Earth's crust and upper mantle of Northern Eurasia according to nuclear-explosion seismic profiling]. Moscow: Geos, 2014. 192 p.

Pushcharovskii Yu. M., Pushcharovskii D. Yu. Geologiya mantii Zemli [Geology of the Earth's mantle]. Moscow: Geos, 2010. 138 p.

Rodkin M. V., Nikitin A. N., Vasin R. N. Seismotektonicheskie efekty tverdofaznykh prevrashchenii v geomaterialakh [Seismotectonic effects of solid-phase transformations in geomaterials]. Moscow: Geos, 2009. 198 p.

Tsvetkova T. A., Shumlyanskaya L. A., Bugaenko I. V., Zaets L. N. Seismotomografiya Vostochno-Evropeiskoi platformy: trekhmernaya R-skorostnaya model' mantii pod Fennoskandiei – 1 [Seismic tomography of the East-European Platform: the three-dimensional P-velocity model of the mantle under Fennoscandia – 1]. Geofiz. zhurn. [Geophysical J.]. 2009. Vol. 31, no. 1. P. 53–72.

Tsvetkova T. A., Shumlyanskaya L. A., Bugaenko I. V., Zaets L. N. Seismotomografiya Vostochno-Evropeiskoi platformy: trekhmernaya R-skorostnaya model' mantii pod Fennoskandiei – 2 [Seismic tomography of the East-European Platform: the three-dimensional P-velocity model of the mantle under Fennoscandia – II]. Geofiz. zhurn. [Geophysical J.]. 2010. Vol. 32, no. 1. P. 60–77.

Tsvetkova T. A., Bugaenko I. V., Zaets L. N. Trekhmernaya R-skorostnaya model' mantii Fennoskandii [Three-dimensional P-velocity model of the mantle under Fennoscandia]. Saarbrücken (Deutschland): LAP LAMBERT Academic Publ., 2015a. 138 p.

Tsvetkova T. A., Bugaenko I. V., Zaets L. N. Struktura nizkoskorostnykh oblastei v mantii Severnoi Evropy [The structure of low-velocity zones in the mantle of Northern Europe]. Trudy KarNTs RAN [Trans. KarRC RAS]. 2015b. No. 7. P. 106–126. doi: 10.17076/geo157

Tsvetkova T. A., Bugaenko I. V. Struktura skorostnoi etazhnosti mantii pod Fennoskandiei po dannym seismotomografii [The structure of velocity mantle number of horizons under Fennoscandia according to seismic tomography data]. Geofiz. zhurn. [Geophysical J.]. 2016. Vol. 38, no. 1. P. 57–77.

Sharov N. V. Litosfera Baltiiskogo shchita po seismicheskim dannym [Lithosphere of the Baltic Shield according to seismic data]. Apatity: KSC RAS, 1993. 141 p.

Sharov N. V. Litosfera Severnoi Evropy po seismicheskim dannym [Lithosphere of Northern Europe according to seismic data]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2017. 168 p.

Sharov N. V., Sviridenko L. P. Evolyutsiya litosfery Fennoskandinavskogo shchita v dokembrii [Evolution of the Fennoscandian Shield lithosphere in the Precambrian]. Geofiz. zhurn. [Geophysical J.]. 2017. Vol. 39, no. 5. P. 47–62.

Yudakhin F. N. Geodinamicheskie protsessy v zemnoi kore i seismichnost' kontinental'noi chasti Evropeiskogo Severa [Geodynamical processes in the Earth's crust and seismicity of the continental part of the European North]. Litosfera [Lithosphere]. 2002. No. 2. P. 3–23.

Burakhovich T. K., Kushnir A. N., Tsvetkova T. O. Recent research of geophysical parameters of the lithosphere of the East-European Platform. Geodinamika [Geodynamics]. 2015. No. 2(15). P. 112–114.

International Seismological Centre. 2017. URL: <http://www.isc.ac.uk> (accessed: 28.12.2017).

Shchipansky A., Bogdanova S. V. The Sarmatian crustal segment: Precambrian correlation between the Voronezh Massif and the Ukrainian Shield across the Dniepr-Donets aulocogen. Tectonophysics. 1996. No. 268. P. 109–125.

Received May 07, 2018

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Цветкова Татьяна Алексеевна

ведущий научный сотрудник отдела сейсмической безопасности  
Институт геофизики Национальной академии наук Украины  
пр. Палладина, 32, Киев, Украина, 03680  
эл. почта: tsvetas@ukr.net

### Бугаенко Игорь Валентинович

научный сотрудник отдела сейсмической безопасности  
Институт геофизики Национальной академии наук Украины  
пр. Палладина, 32, Киев, Украина, 03680  
эл. почта: igor\_bugaenko@ukr.net

## CONTRIBUTORS:

### Tsvetkova, Tatyana

Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine  
32 Palladin Av., 03142 Kiev, Ukraine  
e-mail: tsvetas@ukr.net

### Bugaenko, Igor

Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine  
32 Palladin Av., 03142 Kiev, Ukraine  
e-mail: igor\_bugaenko@ukr.net

**Заец Лариса Николаевна**

старший научный сотрудник отдела сейсмической безопасности

Институт геофизики Национальной академии наук Украины  
пр. Палладина, 32, Киев, Украина, 03680

эл. почта: larysa\_zaiets@ukr.net

**Zaets, Larisa**

Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine

32 Palladin Av., 03142 Kiev, Ukraine

e-mail: larysa\_zaiets@ukr.net