

УДК 550.34

А.С. СЕРДЮКОВ, А.А. ТАТАУРОВА, И.Ю. КУЛАКОВ,  
А.В. КОНОВАЛОВ, В.И. МИХАЙЛОВ, Д.А. САФОНОВ,  
А.А. ДУЧКОВ, А.А. НИКИТИН

## Исследование глубинного строения южной части Сахалина методом сейсмотомографии

*Впервые для южной части Сахалина методом сейсмической томографии были построены скоростные разрезы продольных волн до глубины 30 км. На основе полученных скоростных моделей произведено уточнение положения гипоцентров местных землетрясений, произошедших на юге острова. Выявлены неоднородности скоростного строения, часть из которых хорошо коррелирует с крупными разломными зонами и геологическим строением района. Полученные результаты могут быть использованы для детализации глубинного строения острова и уточнения его тектонической истории.*

*Ключевые слова:* Сахалин, глубинное строение, сейсмоструктура, сейсмическая томография.

**Studying deep structure of the South Sakhalin by seismic tomography.** A.S. SERDYUKOV, A.A. TATAUROVA, I.Yu. KOULAKOV (Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Novosibirsk) A.V. KONOVALOV (Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, V.I. MIKHAILOV (Sakhalin Regional Seismological Center, Geophysical Survey of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk), D.A. SAFONOV (Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Sakhalin Regional Seismological Center, Geophysical Survey of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk), A.A. DUCHKOV, A.A. NIKITIN (Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Novosibirsk).

*For the first time we have constructed cross sections in seismic velocities of primary waves down to the depth of 30 km for the South Sakhalin using the method of seismic tomography. These seismic models were used for updating the location of local earthquake hypocenters happened in the south part of the Sakhalin. Some of the velocity model anomalies show good correlation with major fault zones and geologic structure of the region. Obtained results can be used for refining the geologic structure of Sakhalin and getting better idea about its tectonic origination and development.*

*Key words:* Sakhalin, deep structure, seismotectonics, seismic tomography.

---

СЕРДЮКОВ Александр Сергеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ТАТАУРОВА Антонина Андреевна – научный сотрудник, КУЛАКОВ Иван Юрьевич – доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, ДУЧКОВ Антон Альбертович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, НИКИТИН Александр Алексеевич – младший научный сотрудник (Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН им. А.А. Трофимука, Новосибирск), \*КОНОВАЛОВ Алексей Валерьевич – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией (Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск), САФОНОВ Дмитрий Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник (Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Сахалинский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Южно-Сахалинск), МИХАЙЛОВ Валентин Иванович – начальник отдела полевых наблюдений (Сахалинский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Южно-Сахалинск). \*E-mail: a.konovlov@imgg.ru

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 15-05-06752).

## Введение

Территория о-ва Сахалин относится к системе островных дуг северо-западного сектора Тихоокеанского складчатого пояса. Сахалин отделен от континентальных структур Сихотэ-Алиня прогибом Татарского пролива, который расширяется на юг в сторону глубоководной котловины Японского моря. К востоку от острова располагаются шельф Охотского моря, Южно-Охотская впадина с корой океанического типа в тылу современной Курильской островной дуги [1, 6].

В региональном тектоническом плане о-в Сахалин обычно рассматривается как кайнозойская складчатая область [7]. Западная часть Сахалина сложена обломочными сериями позднего мела – плиоцена. Она содержит продукты разрушения вулканических пород и в целом формировалась на сравнительно малых глубинах. Присутствуют также пачки туфов и вулканитов островодужного типа. Складчатые комплексы Восточно-Сахалинской зоны характеризуются хаотическим строением, присутствием типично субдукционных комплексов, в составе которых можно выделить метаморфические породы, образовавшиеся при высоких давлениях, хаотические комплексы с многочисленными глыбами палеозойских и раннемезозойских пород. Аккреционные комплексы Сахалина перекрыты чехлом неогеново-четвертичных осадков [6]. Мощность осадочного чехла достигает 10–15 км [1, 4].

Северная часть острова сложена кайнозойскими терригенными осадками. На юге Сахалина присутствуют относительно древние горные породы, слагающие Сусунайский метаморфический комплекс и характерные также для Восточно-Сахалинских гор в средней части острова. Комплексы таких пород отделены Сусунайской депрессией на юге и Центрально-Сахалинской депрессией в средней части острова от Западно-Сахалинского хребта. При этом отмечается надвиг Западно-Сахалинского хребта на более древние жесткие и устойчивые восточные структуры [5, 7, 9]. Надвиг соответствует Центрально-Сахалинской зоне разломов.

Для о-ва Сахалин характерна мелкофокусная коровая сейсмичность с гипоцентрами в интервале глубин от 5 до 30 км. Фоновая сейсмичность здесь составляет 8–9 баллов, а в некоторых случаях достигает 10 баллов [12]. Примером проявления высокой сейсмической активности на данной территории служит Невельское землетрясение магнитудой  $M_w = 6,2$ , произошедшее в 2007 г.

Южная часть острова является наиболее густонаселенной. Высокая сейсмическая активность территории острова позволяет проводить исследования методом сейсмической томографии. Тем не менее такие исследования ранее не проводились. Цель данной работы – исследование южной части о-ва Сахалин, где развернута достаточно плотная сеть станций.

В данной работе представлены скоростные разрезы продольных сейсмических волн и уточненное распределение гипоцентров, полученные методом сейсмической томографии. Результаты были сопоставлены с существующими картами геологических формаций и тектонических структур [7], что позволило сделать выводы об особенностях тектонического строения и сейсмичности южной части острова.

Рельеф, основные и второстепенные разломы исследуемой территории приведены на рис. 1а [7]. Наиболее крупной разрывной структурой является Центрально-Сахалинский взбросо-надвиг (II), представленный группой разломов с падением на запад под углом 60–80°. Восточнее Центрально-Сахалинского разлома выделяют крупные Сусунайский (III) и Мерейский (IV) разломы.

Западно-Сахалинские горы субмеридиального простираения образовались в плиоцен-четвертичное время (1–4 млн л.н.) в ходе сахалинской фазы складчатости. Восточные горные сооружения о-ва Сахалин, в его южной части представленные Сусунайским и Тонино-Анивским хребтами, возникли в конце позднего мела – начале палеогена (60–70 млн л.н.) в результате проявления ларамийской фазы складчатости, а затем в сахалинскую фазу

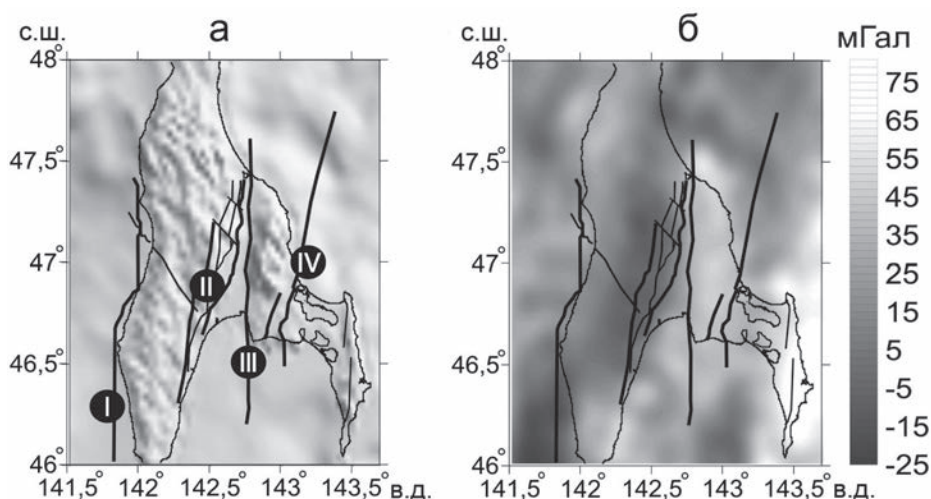


Рис. 1. Рельеф и основные разломы (а) и карта гравитационных аномалий Буге (б) южной части о-ва Сахалин. I – Западно-Сахалинский, II – Центрально-Сахалинский, III – Сусунайский, IV – Мерейский разломы

складчатости видоизменялись. Особенности рельефа, геологических структур и формаций западных и восточных горных сооружений острова согласуются с гравитационными данными, взятыми нами из открытых источников (результатов обработки спутниковых наблюдений) [14]. На рис. 1б показаны гравитационные аномалии Буге, отчетливо прослеживается переход от отрицательных аномалий в западной части к положительным аномалиям в восточной части острова.

Результаты глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), проведенного в 60-х годах прошлого века, свидетельствуют о том, что граница Мохоровичича располагается в интервале глубин 25–40 км [2]. По результатам обработки данных, полученных на профиле, проходящем через южную часть о-ва Сахалин, выделен Центрально-Сахалинский разлом. Значения скоростей сейсмических волн в горных породах восточнее Центрально-Сахалинского разлома выше, чем в породах западнее разлома [2]. Результаты многочисленных исследований свидетельствуют о том, что сейсмичность восточной части южного Сахалина ниже, чем западной [10].

### Обработка сейсмических данных методом лучевой томографии

В работе обрабатывались данные локальной сейсмологической сети, состоящей из 18 станций (рис. 2а), за период 2005–2015 гг. Данные предоставлены Сахалинским филиалом Геофизической службы РАН.

Использовались времена пробега сейсмических волн и предварительно определенные гипоцентры для более чем 10 тыс. событий. Далее производился отсев некондиционных данных. Каждому событию должно было соответствовать как минимум 10 значений времен пробега. На основе численных расчетов в априорной скоростной модели оценивались невязки времен пробега. Значения, для которых невязки составляли более 2 с, исключались из процесса обработки. Таким образом было отобрано порядка 2000 землетрясений. Распределение их эпицентров показано на рис. 2б.

Построение скоростных моделей осуществлялось методом сейсмической томографии в пакете LOTOS [13]. Процедура первоначальной локализации гипоцентров выполнялась с использованием горизонтально-слоистой априорной модели, построенной по данным сейсмологии, ГСЗ и промышленных взрывов [3]. Далее проводилась поэтапная детализация скоростной модели путем решения соответствующей линейаризованной обратной задачи

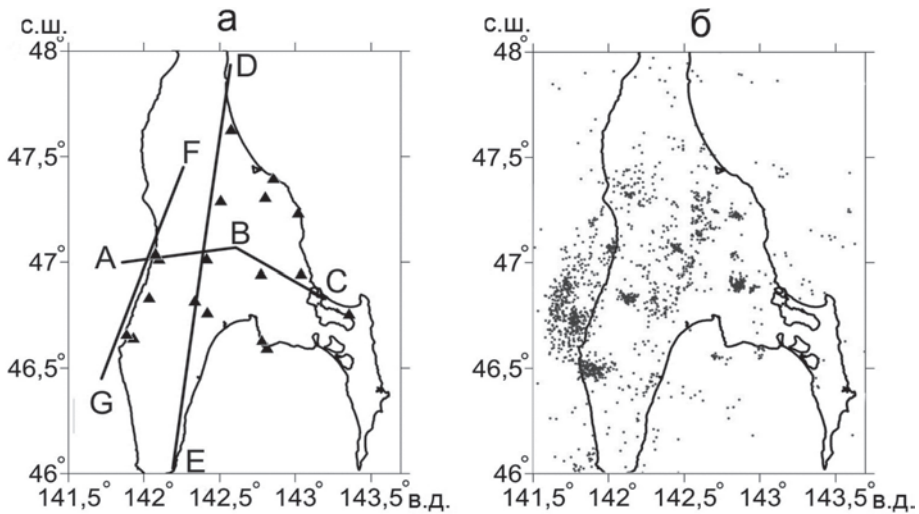


Рис. 2. Положение станций сейсмологической сети (а) и эпицентры событий, использованных для сейсмической томографии (б). Показаны линии, вдоль которых построены вертикальные скоростные разрезы сейсмических волн

с одновременным уточнением положения очагов землетрясений. На каждом этапе расчета происходит переопределение и уточнение положения гипоцентров сейсмических событий. Всего было проведено четыре итерации. Большее количество итераций оказалось нецелесообразным, так как прекращается минимизация невязок времен пробега.

На рис. 3 представлены результаты томографии после первой и четвертой итерации. Показаны распределение значений скорости продольных волн и положения гипоцентров на вертикальном разрезе вдоль линии ВС (рис. 2а). На рисунке видно, что в ходе уточнения скоростной модели наблюдается кластеризация «облака» гипоцентров. Это позволяет выявлять сейсмически активные разломы.

На рис. 4 представлено распределение скоростных аномалий продольных волн. Приведены горизонтальные срезы для разных глубин. На каждом из разрезов показаны отклонения от среднего значения скорости продольных волн на данной глубине. Видно, что Центрально-Сахалинский разлом ограничивает с запада высокоскоростную аномалию, которая по расположению соответствует Сусунайскому хребту и низменности. Мерейский разлом ограничивает эту аномалию с востока. Полученный результат соответствует тому факту, что Сусунайский хребет сложен метаморфическими массивами на фоне преимущественно осадочных пород [1].

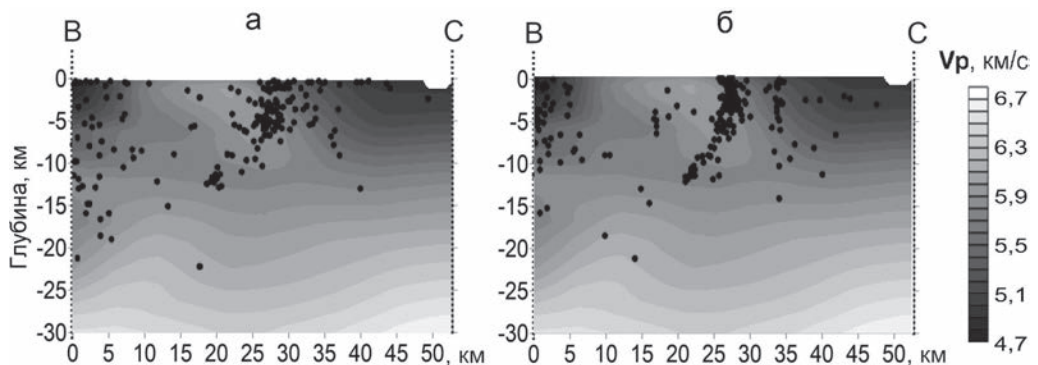


Рис. 3. Скоростная модель для продольных волн и положение гипоцентров (точки): а – первая, б – четвертая итерация томографической инверсии. На нижней оси – расстояние вдоль профиля

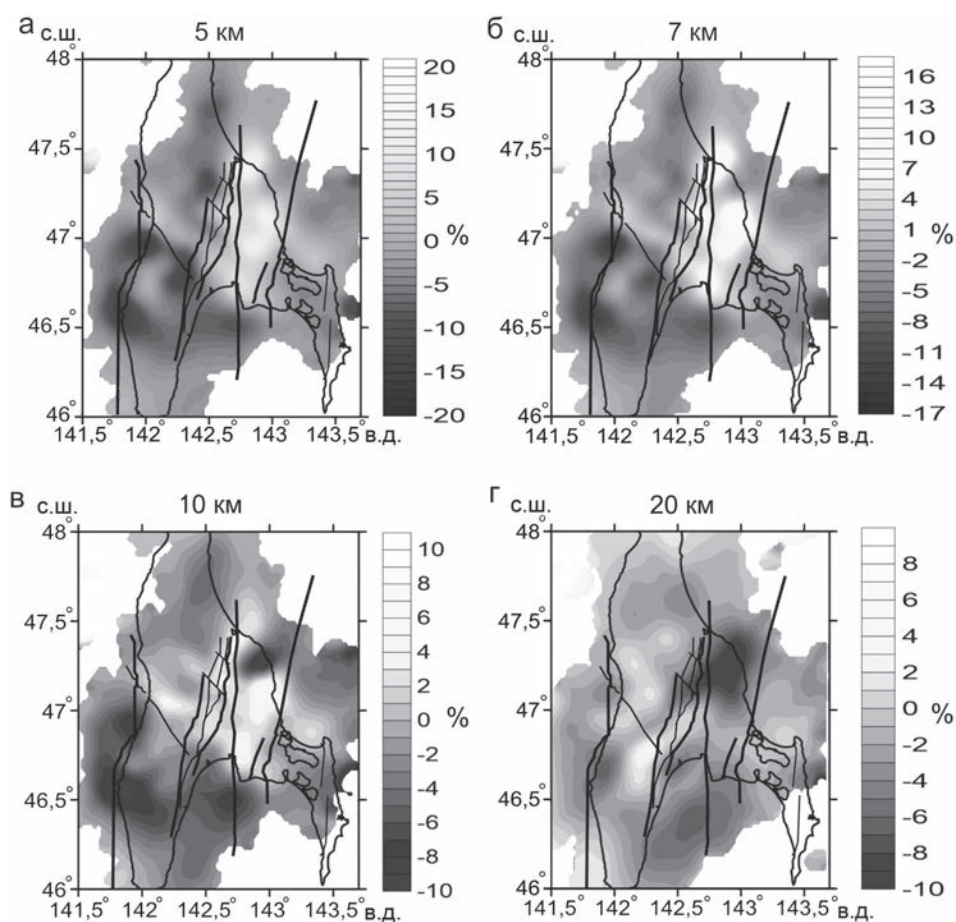


Рис. 4. Распределение скоростных аномалий (продольная волна) на различных глубинах (указаны сверху над панелями)

На рис. 5а приведен результат томографической инверсии: показан вертикальный скоростной разрез продольных волн вдоль той же линии АВС (см. линию на рис. 2а), по которой сделан структурно-формационный разрез из работы [7] (рис. 5б). На рисунке хорошо прослеживается связь между распределениями значений скорости (рис. 5а) и геологическими формациями (рис. 5б). Например, виден выход более высокоскоростных метаморфических пород под Сусунайским хребтом (это также соответствует выводам по результатам обработки данных ГСЗ [8] о больших скоростях в восточной части профиля). Низкоскоростные аномалии в верхней части разреза вдоль профиля АВ коррелируют с более молодыми комплексами горных пород западной части острова. Видно, что ниже, на глубине 7–10 км, они подстилаются метаморфизованными породами с более высокими значениями скоростей распространения продольных сейсмических волн. В середине сегмента АВ прослеживается высокоскоростная структура, которая соответствует поднятию на структурно-формационном разрезе.

Большая часть гипоцентров сейсмических событий в левой части разреза вдоль профиля АВ располагается на глубине ниже 5–7 км и распределена относительно равномерно в высокоскоростном подстилающем слое. Под Западно-Сахалинскими горами наблюдается малоглубинная сейсмическая активность, соответствующая молодой развивающейся складчатой структуре. В окрестности прослеживается (точкой В на профиле) слабо выраженная линейная структура (концентрация гипоцентров), круто падающая в западном направлении. Ее можно связать с Центрально-Сахалинским разломом. Распределение

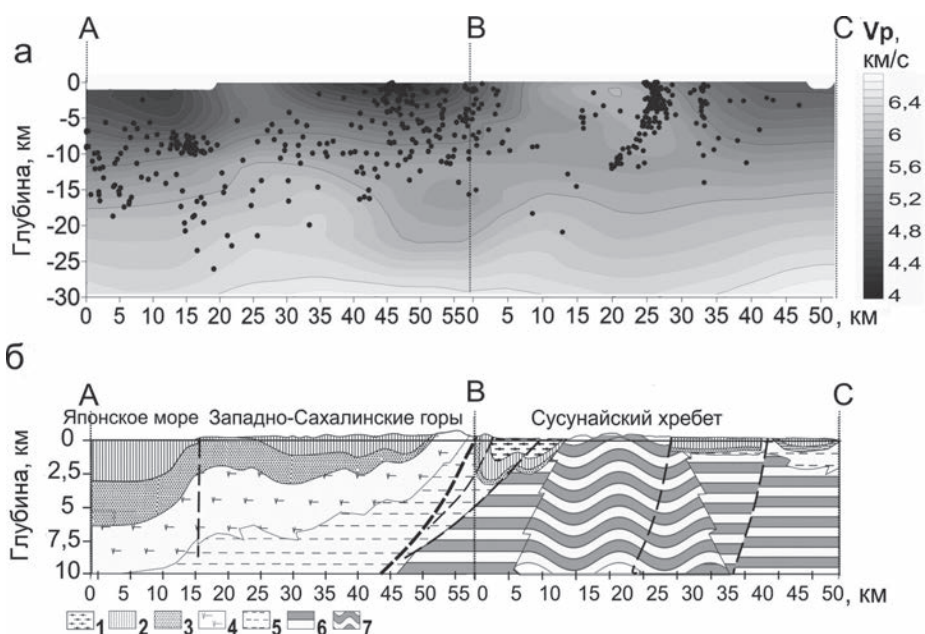


Рис. 5. Вертикальные разрезы и геологические структуры вдоль профиля ABC (г. Холмск – пос. Охотское [7]): а – сейсмотомографический разрез (скорости Р-волн цветом и гипоцентры точками, показаны нормальные проекции для вертикального слоя шириной 15 км в обе стороны от линии ABC); б – структурно-формационный разрез. Черные штриховые линии – разломы; 1–7 – геологические формации: 1 – лигнит-конгломерато-песчаная позднемиоцен-плиоценовая, 2 – кремнистых алевролитов и аргиллитов, вулканитовые (андезито-базальтовая и дацит-андезитовая) ранне-среднемиоценовые, 3 – песчаных алевролитов и аргиллитов олигоценовая и угленосно-песчаник-алевролитов-аргиллитовая палеоцен-эоценовая, 4 – вулканит-конгломерат-алевролитов-песчаниковая позднемеловая, 5 – алевролитов-аргиллитовая позднемеловая, 6 – металитовая мезозойская мегаформация, 7 – формация метаморфических сланцев палеозой-мезозойской надформации

гипоцентров свидетельствует о надвигании западной части на восточную в условиях субширотного сжатия.

В восточной части на рис. 5а наблюдается пониженный уровень сейсмичности (сегмент ВС). Распределение гипоцентров в этой области имеет выраженный роевой характер, рои формируют «каналообразные» облака, круто падающие в западном направлении от поверхности до глубин 10–15 км. Роевой характер сейсмичности Сахалина отмечается в работе [10]. Найденные нами распределения гипоцентров позволяют отчетливо выделить эти сгущения (см. также рис. 3). Пример такого «канала» (роя) виден в средней части сегмента ВС (рис. 5а). Из карты распределения эпицентров, приведенной на рис. 2б, видно, что это изолированный рой.

На рис. 6 показаны вертикальные скоростные разрезы продольных сейсмических волн в субмеридиональном направлении (см. рис. 2а, линии DE и FG), точками показаны уточненные положения гипоцентров (нормальные проекции для вертикального слоя шириной 15 км в обе стороны от этих линий). Видно, что для этих разрезов сохраняются описанные выше особенности распределения сейсмичности: для профиля FG, расположенного западнее Западно-Сахалинских гор, очаги сейсмичности находятся преимущественно глубже 5–7 км; для профиля DE, проходящего через Западно-Сахалинские горы, значительная часть землетрясений возникает на меньших глубинах.

Сейсмическая активность на исследуемой территории в значительной мере представлена афтершоковыми и роевыми последовательностями землетрясений. По всей площади района наблюдаются изолированные рои (см. небольшие по площади изометричные сгущения эпицентров на рис. 2б). Новым результатом нашей работы является уточнение структуры этих роев – они формируют локализованные «каналы», которые уходят от

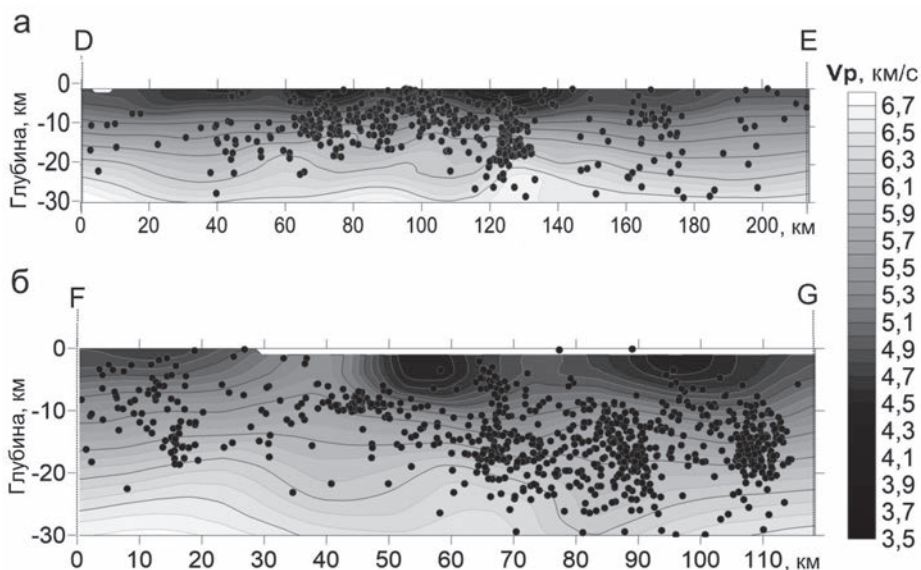


Рис. 6. Сейсмотомографические разрезы (скорости Р-волн цветом и гипоцентры точками) по профилям DE (а) и FG (б)

поверхности на глубину порядка 15 км с крутым падением на запад. Такое распределение роеподобных последовательностей при наличии длинных субмеридиональных разломов в условиях субширотного сжатия является косвенным признаком наличия разломов, ориентированных с северо-запада на юго-восток (некоторые из них представлены на рис. 1а). Можно предположить, что сейсмическая активность возникает в узлах пересечения этой разноориентированной системы разломов.

### Заключение

В работе приведены результаты обработки данных землетрясений для юга о-ва Сахалин за период 2005–2015 гг. методом сейсмической томографии. Были построены трехмерные сейсмотомографические модели скоростей Р-волн, проведено переопределение положения гипоцентров сейсмических событий.

Приведен ряд вертикальных разрезов скоростей Р-волн и положений гипоцентров сейсмических событий. Сопоставление полученных результатов с известными данными о геологическом строении острова показало, что скоростные аномалии хорошо коррелируют с выделяемыми геологическими комплексами. Облака гипоцентров формируют локализованные «каналы», которые уходят от поверхности на глубину порядка 15 км. Такое распределение роеподобных последовательностей может служить косвенным признаком сложной сети разломов, если эти активизации отмечают узлы пересечения разломов, ориентированных субмеридианально и в направлении СЗ–ЮВ. Таким образом, дальнейшее уточнение тонкой структуры сейсмичности данного района методом сейсмотомографии позволит получить новую информацию о сложной системе разломов и тектонических процессах о-ва Сахалин.

Приведенные результаты подтверждают сложное и неоднородное строение острова. В дальнейшем будет интересно сопоставить их с тектонокластическим анализом напряжений и деформаций по данным коровых землетрясений [11] и провести геомеханическое моделирование процессов взаимодействия разломных зон в условиях субширотного сжатия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Геология СССР. Т. 33. Остров Сахалин. Ч. 1. Геологическое описание / под ред. В.Н. Верещагина. М.: Недра, 1970. 432 с.
2. Глубинное строение земной коры Сахалино-Хоккайдо-Приморской зоны / под ред. С.М. Зверева, Ю.В. Тулиной. М.: Наука, 1971. 286 с.
3. Ким Ч.У., Сен Р.С. Результаты сейсмических исследований в окрестности Южно-Сахалинска с использованием цифровых сейсмических станций // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. Т. 5. С. 163–175.
4. Лившиц М.Х. Глубинное строение Сахалина по геофизическим данным // Геофиз. сб. Южно-Сахалинск, 1972. Вып. 24, № 2. С. 16–25.
5. Лободенко И.Ю. Голоценовые тектонические нарушения (палеосейсмодислокации) в зонах Хоккайдо-Сахалинского и Центрально-Сахалинского разломов: автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. М., 2010. 22 с.
6. Метелкин Д.В., Верниковский В.А. Региональная геология России. Новосибирск, Новосиб. гос. ун-т, 2005. 96 с.
7. Невельское землетрясение и цунами 2 августа 2007 года, о. Сахалин / под ред. Б.В. Левина, И.Н. Тихонова. М.: Янус-К, 2009. 200 с.
8. Рихтер А.В. Блоковая структура Сусунайского хребта (Южный Сахалин) // Тектоника. 1981. № 2. С. 99–106.
9. Рождественский В.С. Активный рифтинг в Японском и Охотском морях и тектоническая эволюция зоны Центрально-Сахалинского разлома в кайнозое // Тихоокеан. геология. 2008. Т. 27, № 1. С. 17–28.
10. Соловьев С.Л., Оскорбин Л.С., Ферчев М.Д. Землетрясения на Сахалине. М.: Наука, 1967. 178 с.
11. Татаурова А.А. Поля напряжений и деформаций по данным механизмов коровых землетрясений о. Сахалин // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 3 (27). С. 92–101.
12. Уломов В.И., Богданов М.И. Новый комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-2012) // Инженерные изыскания. 2013. № 8. С. 8–17.
13. Koulakov I. LOTOS code for local earthquake tomographic inversion: Benchmarks for testing tomographic algorithms // Bull. Seismol. Soc. Amer. 2009. Vol. 99, N. 1. P. 194–214.
14. Pail R. et al. Combined satellite gravity field model GOCO01S derived from GOCE and GRACE // Geophys. Res. Lett. 2010. T. 37, N 20. doi:10.1029/2010GL044906