

УДК 55(1/9)

А.О. Агибалов¹, В.А. Зайцев², А.А. Сенцов³

ВЫДЕЛЕНИЕ АКТИВНЫХ ДОКЕМБРИЙСКИХ МОРФОСТРУКТУР СЕВЕРНОГО ПРИЛАДОЖЬЯ ПО КОМПЛЕКСУ ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

ФГБУН «Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН», 123242, Москва, Большая Грузинская ул., 10, стр. 1
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

Schmidt Earth Physics Institute RAS, 123242, Moscow, Bol'shaya Gruzinskaya str., house 10-1
Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

На основе анализа и обобщения геолого-геоморфологической информации, в том числе полученных авторами новых данных, разработана схема активных в новейшее время докембрийских морфоструктур Северного Приладожья. При ее составлении учитывали выраженность древних структур в рельефе, приуроченность к ним эпицентров землетрясений, палеосейсмодислокаций, аномалий гелия и радона, а также результаты анализа перемещений пунктов GPS, компьютерного и физического моделирования на эквивалентных материалах.

Ключевые слова: докембрийские морфоструктуры, неотектоническая активизация, Северное Приладожье.

Based on the analysis and generalization of geological and geomorphological information, including new data obtained by the authors, we developed a scheme of activated Precambrian morphostructures of the Northern Ladoga area. When we compiled it, the severity of the ancient structures in the relief, the confinement of the epicenters of earthquakes, paleoseismic dislocations, helium and radon anomalies to them, as well as the results of the analysis of the movement of GPS points, computer and physical modeling on equivalent materials were taken into account.

Key words: Precambrian morphostructures, neotectonic activation, Northern Ladoga.

Введение. В настоящее время накоплен большой объем геологических данных, которые свидетельствуют о неотектонической активности докембрийских пликативных и дизъюнктивных структур Северного Приладожья. Однако вопрос о том, какие из них активны на новейшем этапе, остается недостаточно проработанным, о чем свидетельствует отсутствие выполненных в детальном масштабе схем активных докембрийских морфоструктур для рассматриваемой территории. Кроме того, предмет дискуссий — критерии их выделения в пределах изучаемого района, отличающегося низкой сейсмичностью и слаборасчлененным рельефом, характерным для платформенных территорий. Нами проанализирована и обобщена ранее накопленная геолого-геоморфологическая информация, что позволило разработать схему активных в новейшее время древних структур Северного Приладожья. Ее можно использовать при оценке геодинамической опасности изучаемой территории, расположенной вблизи крупного мегаполиса — Санкт-Петербурга. Кроме того, существующие представления о новейшей активизации докембрийского структурного плана Приладожья были дополнены новыми результата-

ми анализа цифровых моделей рельефа (ЦМР) и горизонтальных движений пунктов GPS, а также данными эманационных радоновых исследований.

Материалы и методы исследований. Для выделения активных докембрийских морфоструктур Северного Приладожья была проанализирована ранее накопленная информация о геоморфологическом строении территории, палео- и современной сейсмичности, аномалиях гелия и радона, учтены результаты компьютерного и физического моделирования на эквивалентных материалах. Кроме того, нами получены новые данные о характере взаимосвязи древнего структурного плана и происходящих в новейшее время движений и деформаций. Методика исследований включает автоматизированное дешифрирование ЦМР с помощью разработанной А.А. Златопольским [2011] программы LESSA, составление схемы величин деформаций по данным о скорости горизонтальных перемещений пунктов GPS, а также измерение объемной активности радона в подпочвенном слое. Рассмотрим каждый из перечисленных методов.

Автоматизированное дешифрирование ЦМР [Цифровая..., 2020] с помощью программы LESSA, принципы работы которой описаны в статье

¹ Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, вед. инж., канд. геол.-минер. н.; *e-mail:* Agibalo@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, вед. науч. с., канд. геол.-минер. н.; *e-mail:* v.zaitsev@mail.ru

³ Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, науч. с.; *e-mail:* alekssencov@yandex.ru

[Златопольский, 2011], позволило выделить линейные элементы, соответствующие линейным понижениям рельефа, составить схемы их плотности и линий вытянутости, розы-диаграммы. Сопоставление построенных схем с геологическим строением территории показало, что наиболее информативна схема плотности линейных элементов, на которой по повышенным значениям этого параметра выделяется значительное количество докембрийских разрывных нарушений. Значимость полученных данных для выделения активных морфоструктур связана с тем, что прямое отражение геологических структур в рельефе традиционно рассматривается как индикатор их неотектонической активности.

С целью выявления активных разломов, по которым на современном этапе происходят горизонтальные смещения, проанализирована скорость движения пунктов GPS [Галаганов и др., 2017]. Анализ заключался в том, что координаты пунктов GPS были рассчитаны в метрической проекции «WGS_1984_World_Mercator» с помощью инструментов программы ArcGis, а соседние станции GPS соединены отрезками, центрам которых присвоены значения величин деформации (ε), рассчитанных по формуле

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l},$$

где l_0 — расстояние между пунктами, м; l — расстояние между пунктами с учетом их смещения за год, м. Аналогичная формула используется в тектонофизике для расчета «процентной» меры деформации [Гончаров и др., 2005].

Известно, что зоны повышенной проницаемости земной коры, нарушающие новейший структурный план, выделяются по аномалиям подпочвенного радона. В ходе полевых исследований на о-вах Хавус и Риеккалансари в 2019 г. нами построено 6 профилей, вдоль которых проводились измерения объемной активности радона в шурфах глубиной 0,5 м, расположенных на расстоянии 100 м один от другого. Все профили пересекали выраженные в рельефе докембрийские структуры — границы гранитогнейсовых куполов Хавус и Риеккалансари, разрывные нарушения локального масштаба. Чтобы исключить влияние метеоусловий, приливных деформаций приповерхностного слоя земной коры [Спивак, 2014], все замеры вдоль одного профиля выполнялись одновременно с помощью нескольких индикаторов радона «RADEX MR 107». Период измерений составлял сутки. Обоснованность используемой методики подтверждается экспериментальными работами, проведенными на территории УОПЭЦ «Чашниково» МГУ имени М.В. Ломоносова [Агибалов, Полетаев, 2019].

Результаты исследований и их обсуждение. Анализ ранее полученных разными исследователями данных позволил сформулировать для территории

Северного Приладожья ряд признаков, свидетельствующих о новейшей геодинамической активности докембрийских структур. К ним относятся: 1) отражение древних структур в современном рельефе; 2) приуроченность к ним повышенных значений крутизны изобазит, построенных по методике В.П. Философова [1960]; 3) приуроченность эпицентров землетрясений и палеосейсмодислокаций к разломам; 4) взаимосвязь с аномалиями гелия и радона; 5) смещения пунктов GPS по активным разломам; 6) данные тектонофизического моделирования. По нашему мнению, выделение активных морфоструктур по одному из перечисленных признаков не будет обоснованным, поскольку на облик рельефа Приладожья влияют не только тектонические, но и экзогенные процессы, а интерпретация ряда деформаций в скальных породах и четвертичных отложениях как палеосейсмодислокаций в некоторых случаях дискуссионна [Верзилин, 2012]. Также нельзя исключать возможность того, что приуроченность эпицентров современных землетрясений к древним разрывным нарушениям имеет случайный характер. Учитывая изложенные выше соображения, нами в качестве активных структур рассматриваются только те, которые выделяются как минимум по трем из перечисленных признаков.

Выполненный разными исследователями анализ рельефа территории Северного Приладожья показал высокую степень взаимосвязи последнего с геологическим строением. Как показано в работах [Агибалов и др., 2018а-б; Шварев, Никонов, 2008; Свириденко, Светов, 2008], все перечисленные в таблице активные докембрийские морфоструктуры отражены в рельефе. Кроме того, вдоль юго-восточного сегмента границы между Карельским и Ладожским геоблоками в районе оз. Янисъярви отмечено смещение озовой гряды, что свидетельствует об активных сдвиговых перемещениях на новейшем этапе [Лукашов, 1976]. Эта структура, наряду с разломами, ограничивающими впадину Ладожского озера с востока и северо-запада, выделяется по повышенным значениям крутизны изобазит [Агибалов и др., 2018а].

Приведенные А.А. Никоновым и его коллегами данные палеосейсмологических исследований в скальных породах позволяют рассматривать Вуоксинский, Северо-, Восточно- и Западно-Ладожские докембрийские разломы как сейсмолинейные элементы [Никонов, Шварев, 2015]. Установлено, что большая часть обнаруженных нами палеосейсмодислокаций в рыхлых четвертичных отложениях [Агибалов., 2019] и эпицентров современных землетрясений [Сейсмологический..., 2020] приурочена к докембрийским разрывным нарушениям регионального масштаба [Куликов и др., 2017; Хазов и др., 2004], что свидетельствует в пользу фрагментарной неотектонической активизации последних. Северо-Ладожский и Вос-

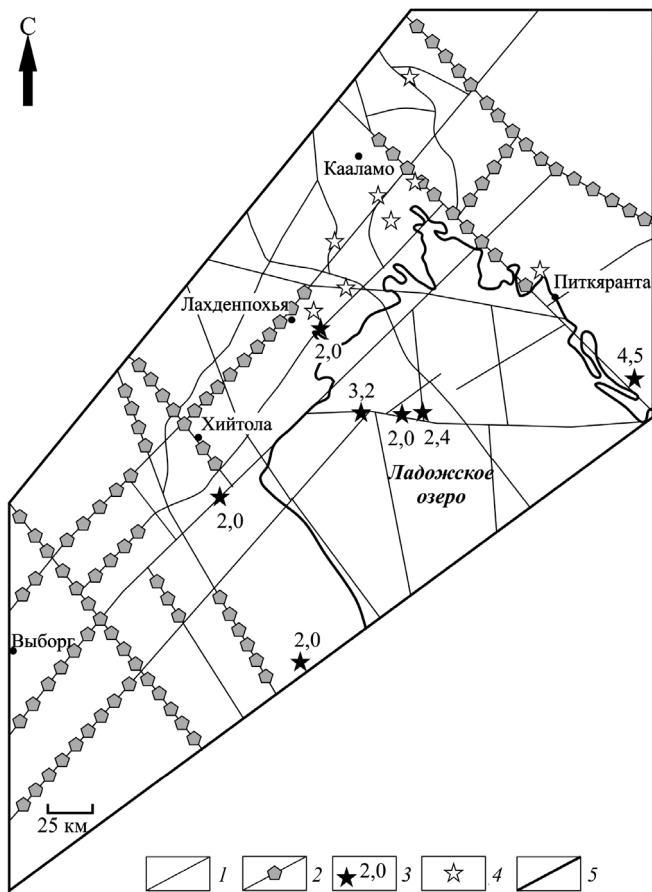


Рис. 1. Схема докембрийских разрывных нарушений Северного Приладожья: 1 — докембрийские разрывные нарушения, по [Куликов и др., 2017; Хазов и др., 2004]; 2 — докембрийские разрывные нарушения, выраженные в рельефе по распределению максимумов плотности линейментов; 3 — эпицентры современных землетрясений, по [Сейсмологический..., 2020]; 4 — палеосейсмодислокации, зафиксированные в рыхлых четвертичных отложениях, по [Агибалов, 2019]; 5 — контуры береговой линии Ладожского озера

точно-Ладожский разломы, юго-восточная часть шовной зоны между Карельским и Ладожским геоблоками выделяются на схеме проницаемости земной коры, составленной по результатам гелиевой съемки [Схема..., 1983]. В работе [Титаева и др., 1995] показана взаимосвязь между аномалиями концентрации радона и разрывными нарушениями о-ва Валаам. Компьютерное и физическое моделирование на эквивалентных материалах показало, что в обстановке северо-западного сжатия, преобладающего на большей части территории Приладожья, могут происходить динамические подвижки по разломам, приведенным в таблице, а также вертикальные блоковые движения, связанные с активизацией гранитогнейсовых куполов [Агибалов и др., 20186]. Таким образом, анализ и обобщение ранее полученных данных позволяет обосновать выделение ряда разрывных нарушений и большей части гранитогнейсовых куполов как морфоструктур, активных в новейшее время.

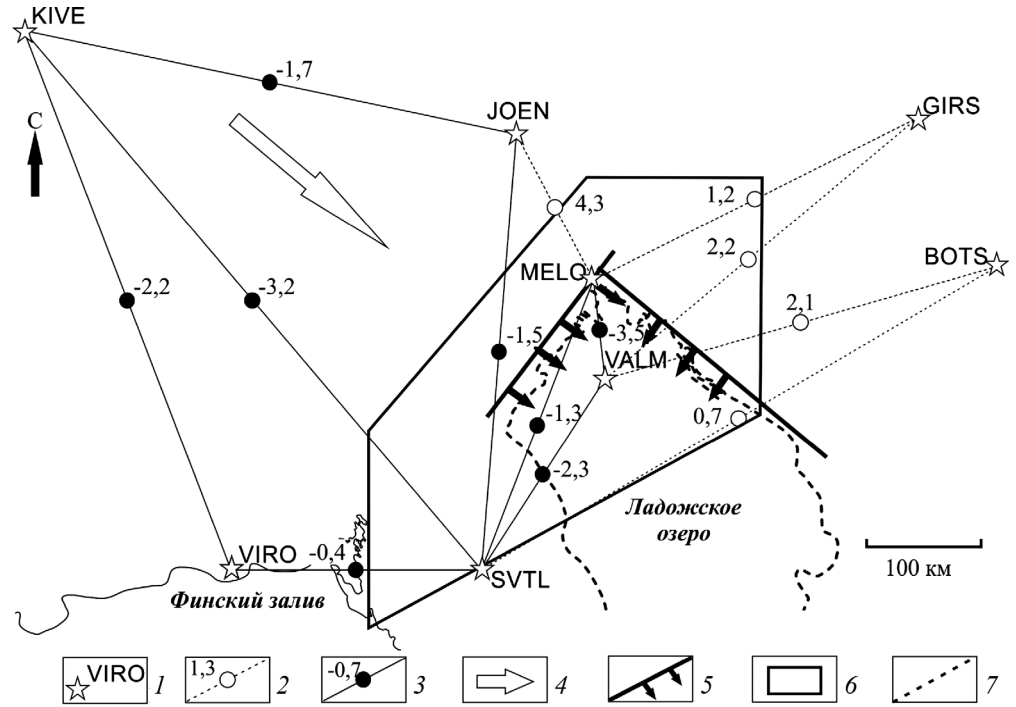
Новые данные о высокой степени взаимосвязи рельефа и древнего структурного плана получены с помощью автоматизированного дешифрирования в программе LESSA ЦМР Северного Приладожья, исключая акваторию Ладожского озера. По распределению максимумов плотности линейментов выделено около 45% от общей протяженности докембрийских разрывных нарушений, рассмотренных в работах [Куликов и др., 2017; Хазов и др., 2004] (рис. 1). Как показано в статье [Баранов и др., 2012], согласованность пространственного рисунка максимумов плотности линейментов и разрывных нарушений служит одним из признаков, указывающих на неотектоническую активность последних.

Активные докембрийские морфоструктуры Северного Приладожья и признаки, по которым они были выделены

| Активные докембрийские морфоструктуры | Признаки, по которым выделены активные морфоструктуры | | | | | |
|--|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Вуоксинский разлом (1-1) | + | | + | | | |
| Северо-Ладожский разлом (2-2) | + | + | + | + | + | + |
| Западно-Ладожский разлом (3-3) | + | | + | | | + |
| Юго-восточный фрагмент Мейерской зоны (4-4) | + | | + | | | + |
| Северо-восточный фрагмент разлома от оз. Пайкъярви до оз. Вахваярви (4-5) | + | | + | | | + |
| Восточно-Ладожский разлом (5-5) | + | + | + | + | + | + |
| Шовная зона между Карельским и Ладожским геоблоками (6-6) | + | | + | + | | + |
| Разломы о-ва Валаам | + | | + | + | | + |
| Гранитогнейсовые купола Иокирантский (I), Сортавальский (II), Кирьяволахтинский (III), Коккасельский (IV), Импилахтинский (V), Мурсульский (VI), Койринойско-Питкярантский (VII) | + | | | | | + |
| Гранитогнейсовый купол Риеккалансари (VIII) | + | | | + | | + |
| Гранитогнейсовый купол Хавус (IX) | + | | | + | | + |
| Синформа, сопряженная с куполом Риеккалансари | + | | | + | | + |

Примечания. Признаки: 1 — отражение древних структур в современном рельефе; 2 — приуроченность к ним повышенных значений крутизны изобазит; 3 — приуроченность эпицентров землетрясений и палеосейсмодислокаций; 4 — взаимосвязь с аномалиями гелия и/или радона; 5 — смещения пунктов GPS по активным разломам; 6 — данные тектонофизического моделирования. Цифры в круглых скобках соответствуют номерам активных морфоструктур, приведенным на рис. 4

Рис. 2. Схема величины изменения длин отрезков, соединяющих соседние пункты GPS: 1 — пункты GPS, по [Галаганов и др., 2017]; 2 — отрезки, испытывающие удлинение, и величины деформаций ($n \cdot 10^{-9}$); 3 — отрезки, испытывающие укорочение, и величины деформаций ($n \cdot 10^{-9}$); 4 — ориентировка оси сжатия, по [Зыков, Полещук, 2016]; 5 — активные докембрийские разрывные нарушения и направления горизонтальных смещений по ним; 6 — границы изучаемого района; 7 — контуры береговой линии Ладожского озера



В результате обработки данных о значениях скорости горизонтальных движений пунктов GPS геодинамических сетей Республики Карелии и Финляндии установлено, что большая часть отрезков северо-западного направления, соединяющих соседние станции GPS (KIVE—JOEN, KIVE—VIRO, SVTL—KIVE), испытывает укорочение. Оно может быть связано с общим северо-западным сжатием юго-восточной части Балтийского щита в новейшее время [Зыков, Полещук, 2016]. Удлинение отрезка MELO—JOEN, также имеющего северо-западное простирание, можно объяснить смещением пункта MELO в юго-восточном направлении по Северо-Ладожскому разлому со сбросовой кинематикой. Увеличение расстояний между пунктами MELO—GIRS, VALM—GIRS, VALM—BOTS и сокращение отрезка VALM—SVTL предположительно связано с влиянием Восточно-Ладожского разлома со сбросовой кинематикой, в пределах висячего крыла которого расположена станция VALM (рис. 2). Полученные результаты позволяют предположить, что разрывные нарушения, ограничивающие впадину Ладожского озера с востока и северо-запада, влияют на перемещение станций GPS.

Изучение объемной активности подпочвенного радона на о-вах Хавус и Риеккалансари показало, что его положительные средние и максимальные аномалии, измеренные в течение суток, приурочены к докембрийским морфоструктурам. К ним относятся границы гранитогнейсовых куполов Хавус и Риеккалансари, сопряженная с куполом Риеккалансари синформа, сложенная

гнейсами ладожской серии, а также расположенное в ее пределах локальное разрывное нарушение северо-восточного простирания. В ходе полевых наблюдений отмечено, что границы обоих гранитогнейсовых куполов и синформы подчеркнуты вертикальными стенками и уступами, а разрывное нарушение северо-восточного простирания находится в пределах небольшого линейного понижения рельефа. Эти данные наряду с результатами компьютерного геодинамического моделирования [Агибалов и др., 2018б] позволяют обосновать выделение рассмотренных гранитогнейсовых куполов и синформы как активных тектонических структур (рис. 3).

Заключение. В результате исследований составлена схема активных докембрийских морфоструктур Северного Приладожья, к которым относятся разломы, ограничивающие котловину Ладожского озера, шовная зона между Карельским и Ладожским геоблоками, Вуоксинский разлом, дизъюнктивные нарушения о-ва Валаам, а также большая часть гранитогнейсовых куполов (таблица, рис. 4). Обоснованность выделения этих структур подтверждается комплексом геоморфологических, сейсмологических и геохимических данных, а также результатами анализа значений скорости перемещения пунктов GPS и тектонофизического моделирования.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках НИР «Развитие методов детального сейсмического районирования и сейсмического микрорайонирования» (№ гос. регистрации АААА-А17-117060110060-3) (ИФЗ РАН).

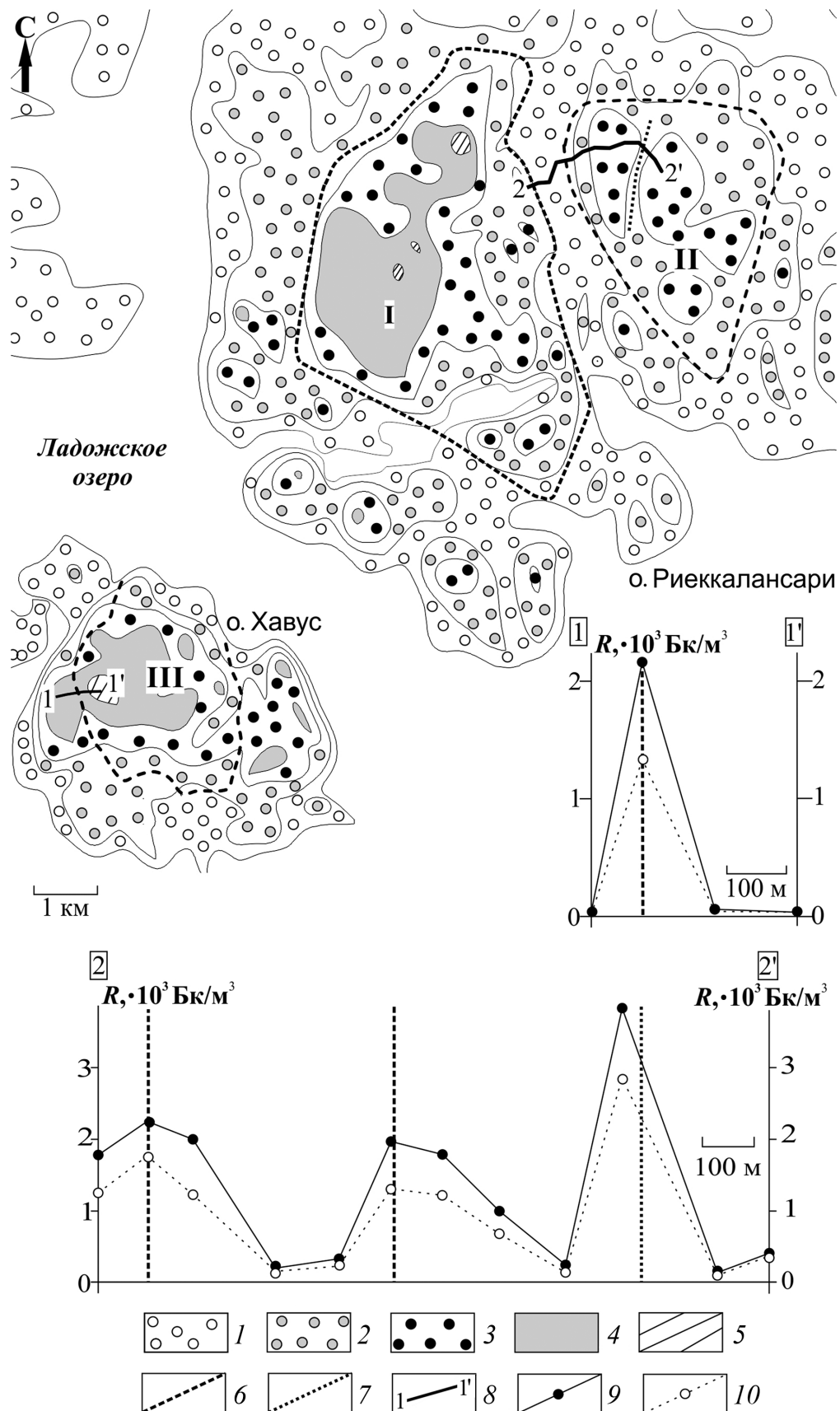
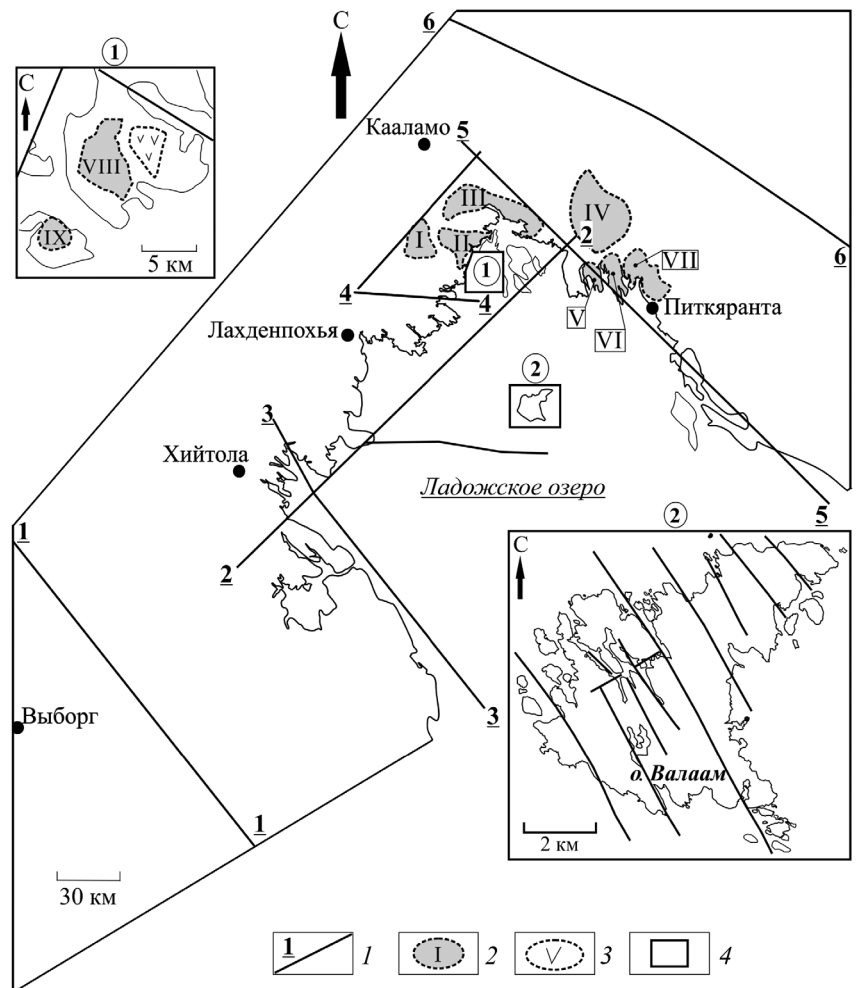


Рис. 3. Схема активных докембрийских морфоструктур о-вов Хавус и Риеккалансари, выделенных по данным анализа рельефа и эманационных радоновых исследований: 1–5 – высотные отметки рельефа, м: 1 – 0–20, 2 – 20–40, 3 – 40–60, 4 – 60–80, 5 – 80–100; 6 – границы гранитоидных куполов Риеккалансари (I) и Хавус (II), а также сопряженной с первым синформы (III); 7 – докембрийское разрывное нарушение; 8 – линии профилей, по которым измеряли объемную активность радона; 9 – максимальные значения объемной активности радона; 10 – средние значения объемной активности радона

Рис. 4. Схема активных докембрийских морфоструктур Северного Приладожья: 1 — разрывные нарушения: 1-1 — Вуоксинский разлом; 2-2 — Северо-Ладожский разлом; 3-3 — Западно-Ладожский разлом; 4-4 — юго-восточный фрагмент Мейерской надвиговой зоны; 4-5 — фрагмент разрывного нарушения северо-восточного простирания, протягивающийся от оз. Пайкъярви до оз. Вахварви; 5-5 — Рускеальско-Салминский рифтообразующий разлом; 6-6 — фрагмент шовной зоны между Карельским и Ладожским геоблоками; 2 — гранитогнейсовые купола: I — Иокрирантский, II — Сортавальский, III — Кирьяволахтинский, IV — Коккасельский, V — Импилахтинский, VI — Мурсульский, VII — Койринойско-Питкярантский, VIII — Риеккалансари, IX — Хавус; 3 — синформа, сопряженная с куполом Риеккалансари; 4 — границы участков, показанных на врезках



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агибалов А.О. Разрывные нарушения в четвертичных отложениях Северного Приладожья как индикатор сеймотектонических процессов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2019. № 2. С. 17–22.

Агибалов А.О., Зайцев В.А., Полетаев А.И., Сенцов А.А. Изучение новейших движений земной коры Северного Приладожья с помощью морфометрических методов и компьютерного моделирования // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 2018а. Т. 93, вып. 1. С. 3–9.

Агибалов А.О., Полетаев А.И., Сенцов А.А., Зайцев В.А. Апробация методики выделения зон повышенной проницаемости земной коры по аномалиям объемной активности радона с помощью прибора RADEX MR 107 // Мат-лы Всеросс. науч. конф. «Прикладные аспекты динамической геологии», посвященной 110-й годовщине со дня рождения Г.П. Горшкова (1909–1984). М.: Перо, 2019. С. 183–185.

Агибалов А.О., Сенцов А.А., Зайцев В.А. Отражение гранито-гнейсовых куполов Приладожья в современном рельефе // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2018б. № 5. С. 72–80.

Баранов Ю.Б., Ванярхо М.А., Кожина Л.Ю. и др. Разрывы и зоны их геодинамического влияния: выявление и картографирование на основе космических и геоинформационных технологий // Вести газовой науки. 2012. № 1. С. 61–67.

Верзилин Н.Н. К проблеме позднеголоценовых сейсмических событий в Юго-Восточном Приладо-

жье // Вестн. СПбГУ. Сер. 7. Геология, география. 2012. Вып. 1. С. 33–38.

Галаганов О.Н., Гусева Т.В., Крупеникова И.С. и др. Деформации земной коры Восточно-Европейской платформы по данным спутникового мониторинга // Мониторинг. Наука и технологии. 2017. № 3. С. 6–14.

Гончаров М.А., Талицкий В.Г., Фролова Н.С. Введение в тектонофизику / Отв. ред. Н.В. Короновский. М.: КДУ, 2015. 496 с.

Златопольский А.А. Новые возможности технологии LESSA и анализ цифровой модели рельефа. Методический аспект // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 38–46.

Зыков Д.С., Полещук А.В. Взаимодействие геодинамических систем на Восточно-Европейской платформе в новейшее время // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 2016. Т. 91, вып. 1. С. 3–14.

Куликов В.С., Светов С.А., Слабунов А.И. и др. Геологическая карта юго-восточной Фенноскандии масштаба 1 : 750 000: новые подходы к составлению // Тр. КарНЦ РАН. Сер. Геология докембрия. 2017. № 2. С. 3–41.

Лукашов А.Д. Новейшая тектоника Карелии. Л.: Наука, 1976. 109 с.

Никонов А.А., Шварев С.В. Сейсмолинементы и разрушительные землетрясения в российской части Балтийского щита: новые решения для последних 13 тысяч

лет // Мат-лы междунар. конф. «Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности». 23–25 сентября 2015 г. / Ред. В.С. Имаев. Нерюнгри: Изд-во Техн. ин-та (ф) СВФУ, 2015. С. 243–251.

Свириденко Л.П., Светов А.П. Валаамский силл габбро-долеритов и геодинамика котловины Ладожского озера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 123 с.

Сейсмологический каталог Хельсинского университета. URL: <http://www.seismo.helsinki.fi/EQ-search/query.php> (дата обращения: 14.02.2020).

Спивак А.А. Проявление разломных зон в геофизических полях // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 2. № 5. С. 507–525.

Схема проницаемости земной коры европейской части СССР по данным гелиевых исследований. Масштаб 1 : 2 500 000. / Ред. А.Н. Еремеев. М.: ВИМС, 1983.

Титаева Н.А., Зыков Д.С., Никулин В.И. и др. Опыт применения радоновой съемки для выявления зон акти-

визации тектонических структур // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1995. № 4. С. 67–73.

Философов В.П. Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур / Под ред. А.А. Корженевского. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1960. 91 с.

Хазов Р.А., Шаров Н.В., Исанина Э.В. Глубинное строение и металлогения Приладожья // Геол. и полезные ископаемые Карелии. 2004. Вып. 7. С. 55–74.

Цифровая модель рельефа. URL: http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_srtm30.cgi (дата обращения: 10.02.2020)

Шварев С.В., Никонов А.А. Линеamentное поле северо-западного Приладожья и его возможная структурная интерпретация // Мат-лы 14-й Междунар. конф. «Связь поверхностных структур с глубинными». Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. С. 343–346.

Поступила в редакцию 19.02.2019

Поступила с доработки 26.02.2020

Принята к публикации 26.02.2020