

УДК 910.3

А.О. Агибалов¹, А.А. Сенцов², В.А. Зайцев³**ОТРАЖЕНИЕ ГРАНИТО-ГНЕЙСОВЫХ КУПОЛОВ СЕВЕРНОГО ПРИЛАДОЖЬЯ В СОВРЕМЕННОМ РЕЛЬЕФЕ**

Проведен анализ рельефа куполовидных структур Северного Приладожья – Хавус, Коккасельской, Риекка, Сортавальской и Йокирантской. Установлено, что субизометричные гранито-гнейсовые купола Хавус и Коккасельский выражены в рельефе как поднятия, в пределах которых по характеру распределения коэффициента развития рельефа выделяется серия концентрических линейментов. Купола более сложной формы могут представлять собой как области поднятия (Риекка, Йокирантский), так и области опускания (Сортавальский). Данные компьютерного моделирования позволяют предположить, что сложный характер взаимосвязи между геологическим строением и современным рельефом во многом обусловлен активизацией куполовидных выступов архейского основания в обстановке северо-западного сжатия.

Ключевые слова: гранито-гнейсовые купола, Приладожье, компьютерное моделирование.

Введение. Северное Приладожье, расположенное в юго-восточной части Балтийского щита, относится к областям развития докембрийских комплексов и отличается сложным геологическим строением. На дневную поверхность в данном регионе выходят архейские гранито-гнейсы, формирующие куполовидные структуры, а межкупольное пространство сложено протерозойскими образованиями среднего структурного этажа Балтийского щита [Морозов, 1999]. В пределах Северного Приладожья закартировано более 20 куполовидных выступов архейского фундамента, размеры которых варьируют от первых километров до первых десятков километров [Морозов, Гафт, 1985]. В настоящее время не существует единой точки зрения по вопросу о природе этих структур: одни исследователи рассматривают их как результат диапиризма [Григорьева, Шинкарев, 1981; Полянский с соавт., 2016], другие полагают, что гранито-гнейсовые купола возникли в ходе интерференционной складчатости [Bowes et al., 1984]. Н.Г. Судовиков и В.А. Глебовицкий разработали модель, предполагающую внедрение гранито-гнейсов в виде жестких глыб и блоков [Судовиков с соавт., 1970]. Такое разнообразие мнений может быть связано с многофакторностью самих структурообразующих процессов [Морозов, 1999].

Гранито-гнейсовые купола по-разному отражены в рельефе: купола Коккасельский и Хавус выражены как области поднятия, Сортавальский – как область опускания, границы купола Латвасюрья плохо прослеживаются по очертаниям гидросети и пространственному рисунку линейных элементов рельефа. Задачи данной работы заключаются в том, чтобы проанализировать особенности проявления куполовидных структур Северного Приладожья в

современном рельефе на примерах гранито-гнейсовых куполов Хавус, Риекка, Сортавальского, Йокирантского и Коккасельского и предложить решение вопроса о возможности их тектонической активизации в новейшее время. Этот процесс рассматривается как один из множества факторов рельефообразования, к которым относятся гляциоизостатические движения, реакция литосферы на изменения уровня воды в Ладожском озере [Амантов, Амантова, 2017], экзарационная и аккумулятивная деятельность ледника [Бискэ, 1959], геологическое строение рассматриваемой территории [Глубинное строение ..., 2004].

Поставленные задачи представляются актуальными в связи с недостаточной изученностью рельефа куполовидных структур. Новизна данной работы обусловлена тем, что она основана на результатах комплексных исследований, проведенных с использованием традиционных и современных методов.

Материал и методы исследований. Исходными материалами для проведения исследований в пределах трех опорных участков, на территории которых располагаются гранито-гнейсовые купола Хавус (рис. 1), Коккасельский (рис. 2) и Риекка (рис. 3), являлись цифровые модели рельефа, построенные путем оцифровки детальных топографических карт масштаба 1:20 000. Для четвертого, более крупного участка, включающего Сортавальский и Йокирантский купола (рис. 4), использовалась модель рельефа, составленная на основе топографической карты масштаба 1:200 000. С целью установления характера и степени выраженности куполовидных структур в рельефе выполнен морфоструктурный анализ, предполагающий выделение линейментов,

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, аспирант; *e-mail:* Agibalo@yandex.ru

² Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, лаборатория сейсмоструктоники и сейсмического микрорайонирования, науч. с.; *e-mail:* alekssencov@yandex.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, зав. лабораторией исследования геокатастроф, канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* v.zaitsev@mail.ru

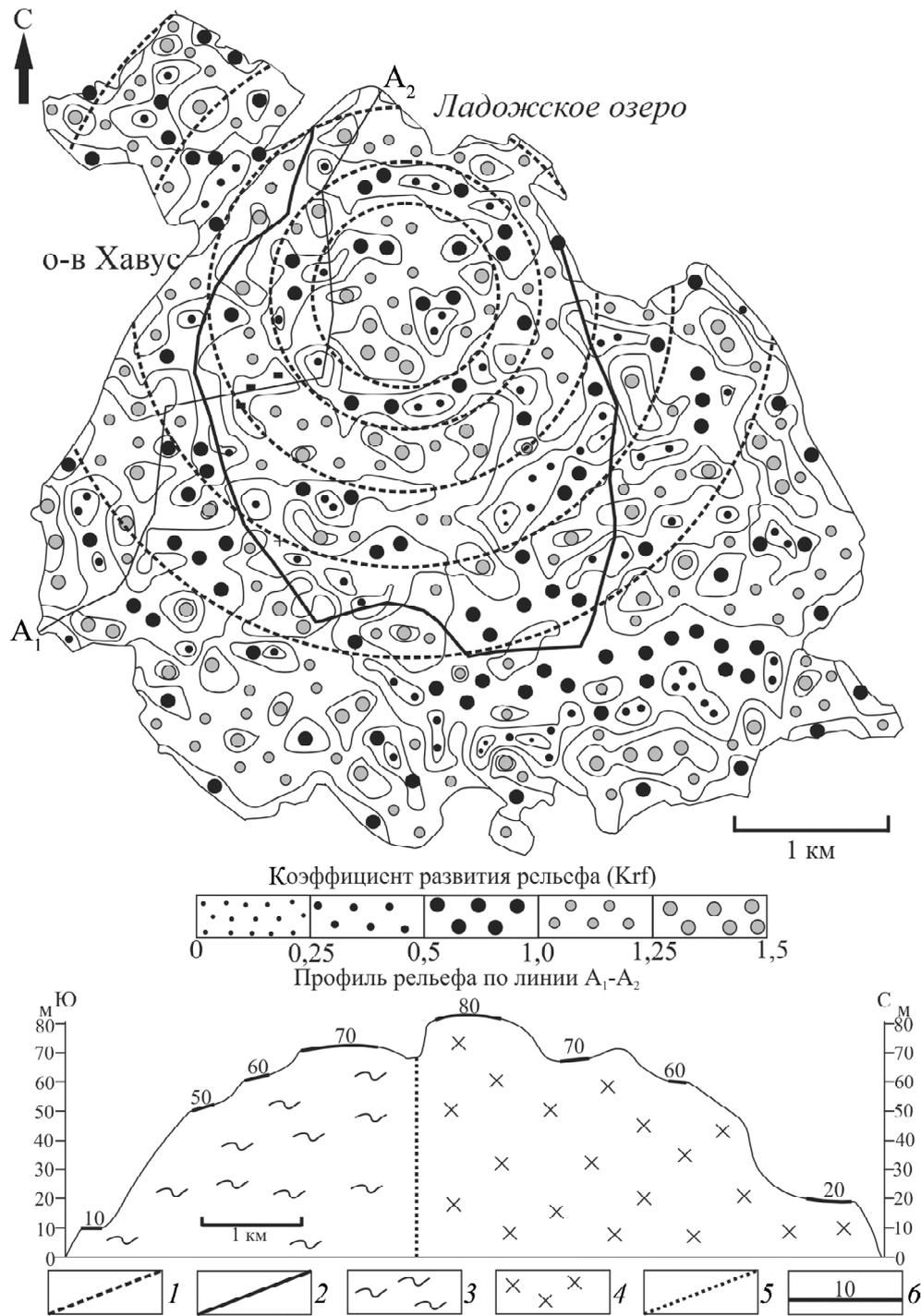


Рис. 1. Схема коэффициентов развития рельефа острова Хавус: 1 – концентрические линейменты, выделенные по рисунку изолиний коэффициента развития рельефа; 2 – контуры гранито-гнейсового купола Хавус (по: [Государственная ..., 2004]); 3 – раннепротерозойские образования ладожского комплекса; 4 – архейские гранито-гнейсы; 5 – граница купола Хавус на профиле рельефа; 6 – выровненные площадки и их высотные отметки (м)

Fig. 1. Scheme of relief development coefficients for the Havus Island: 1 – concentric lineaments identified according to the pattern of isolines of the relief development coefficients; 2 – contours of the Havus granite-gneiss dome (after: [State ..., 2004]); 3 – Early Proterozoic formations of the Ladoga complex; 4 – Archaean granite-gneiss; 5 – boundary of the Havus dome on the relief profile; 6 – leveled areas and their elevations (in meters)

построение схем блоковой делимости по данным анализа рельефа. Подобные исследования проводились И.Г. Авенариусом, внесшим значительный вклад в изучение Арктического региона России [Авенариус, 2008]. Кроме того, были составлены

карты крутизны склонов и кривизны поверхности рельефа. Для отдельных структур (табл.) определены морфометрические показатели максимальные и средние высотные отметки, максимальные и средние значения кривизны поверхности рельефа, кру-

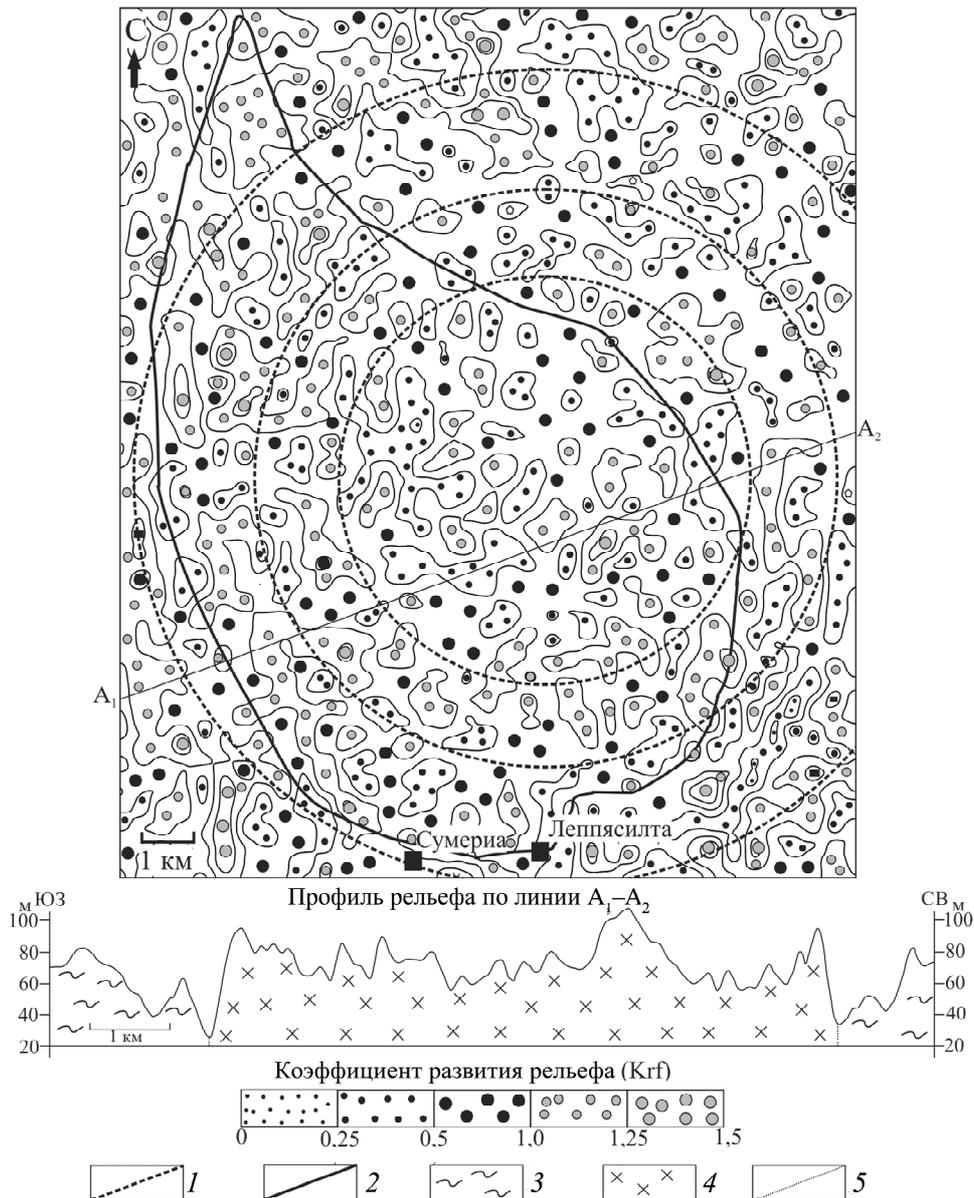


Рис. 2. Схема коэффициентов развития рельефа района Коккасельского гранито-гнейсового купола: 1 – концентрические линейменты, выделенные по рисунку изолиний коэффициента развития рельефа; 2 – контуры Коккасельского гранито-гнейсового купола (по: [Государственная ..., 2004]); 3 – раннепротерозойские образования ладожского комплекса; 4 – архейские гранито-гнейсы; 5 – границы Коккасельского купола на профиле рельефа

Fig. 2. Scheme of relief development coefficients of the Kokkasel'skij granite-gneiss dome: 1 – concentric lineaments identified according to the pattern of isolines of the relief development coefficients; 2 – contours of the Kokkasel'skij granite-gneiss dome (after: [State ..., 2004]); 3 – Early Proterozoic formations of the Ladoga complex; 4 – Archaean granite-gneiss; 5 – boundary of the Kokkasel'skij dome on the relief profile

тизны склонов, стандартные отклонения высотных отметок – обсуждаемые в работах Ю.Г. Симонова [Симонов, 1999; Симонов, 1998]. Проведен расчет коэффициента развития рельефа (Krf) по формуле:

$$Krf = (N_{avg} - N_{min}) / (0,5N_{max} + 0,5N_{min} - N_{min}),$$

где N_{avg} – среднее значение высоты в пределах расчетной ячейки, N_{max} – максимальная высотная отметка, N_{min} – минимальная высота.

По мнению В.Ф. Лысовой, рассматриваемый коэффициент отражает морфологию склонов, связанную

с тенденциями развития рельефа: повышенные значения Krf приурочены к областям с восходящим типом рельефа, развивающимся как поднятия [Лысова, 2004]. В связи с тем, что морфология склонов на территории Приладожья связана с действием различных факторов рельефообразования, а не только влиянием тектонических движений и денудационных процессов, данный параметр рассматривается только как дополнительный инструмент морфометрического анализа.

Отметим, что на геологической карте масштаба 1:200 000 не показаны границы гранито-гнейсо-

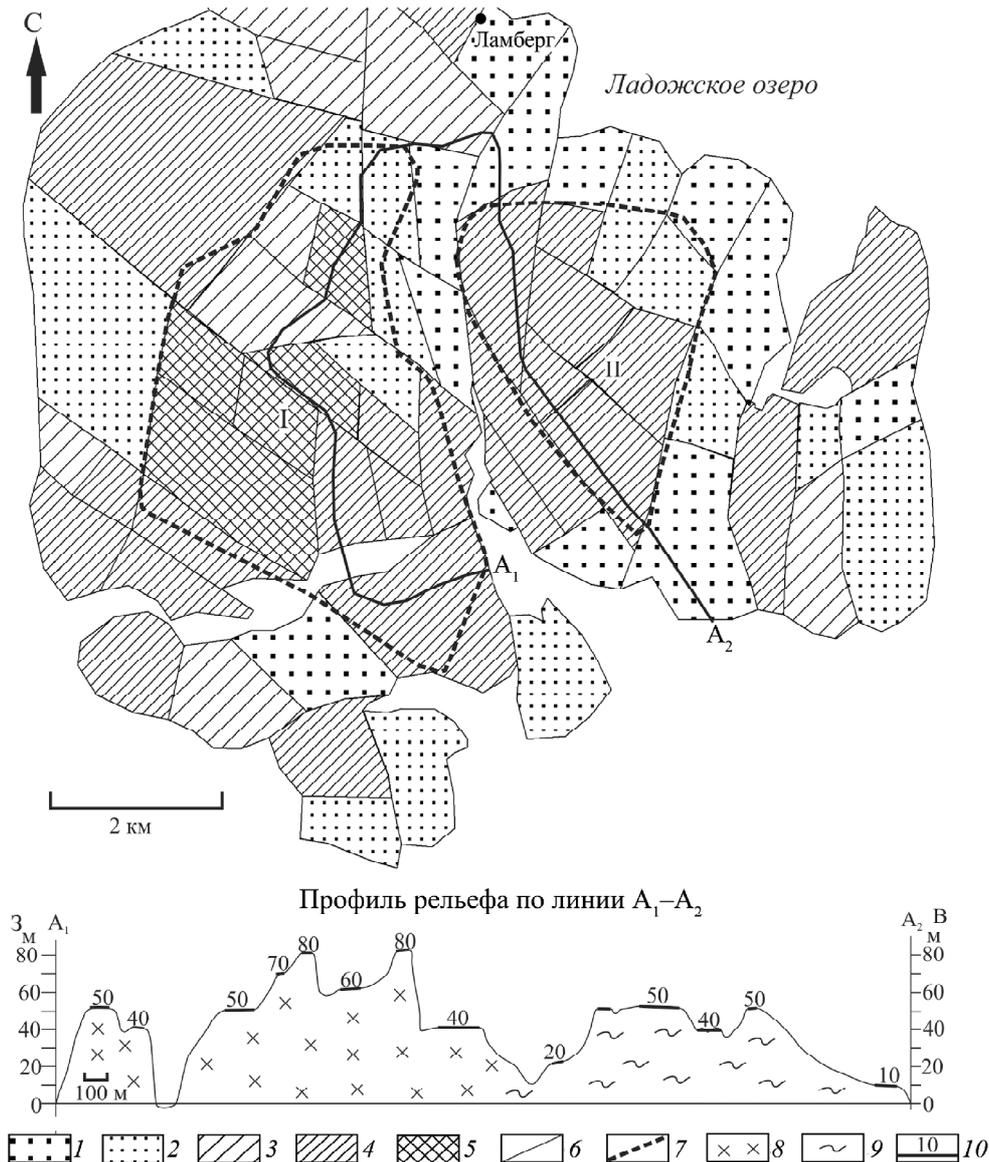


Рис. 3. Схема блоковой делимости южной части острова Риеккалансари, составленная по данным анализа рельефа: 1–5 – максимальные высотные отметки блоков (м): 1 – 21–35, 2 – 35–49, 3 – 49–63, 4 – 63–77, 5 – 77–90; 6 – границы блоков; 7 – контуры тектонических структур: гранито-гнейсового купола Риекка (I) и сопряженной с ним синформы (II); 8 – гранито-гнейсы; 9 – породы ладожского комплекса; 10 – выровненные площадки и их высотные отметки (м)

Fig. 3. Block divisibility scheme of the southern part of the Riekkalansari Island, based on the analysis of relief data: 1–5 – maximum block elevations (in meters): 1 – 21–35, 2 – 35–49, 3 – 49–63, 4 – 63–77, 5 – 77–90; 6 – block boundaries, 7 – contours of tectonic structures: the Rieikka granite-gneiss dome (I) and the conjugated synform (II); 8 – granite-gneiss; 9 – rocks of the Ladoga complex; 10 – leveled areas and their elevations (in meters)

вого купола Риекка и расположенной к востоку от него синформной структуры, сложенной раннепротерозойскими гнейсами ладожской серии [Геологическая ..., 2004]. Детальное картирование докембрийских комплексов, проведенное в южной части острова Риеккалансари, позволило оконтурить данные структуры.

С помощью компьютерного моделирования, выполненного в программе RMS 2013, рассчитаны относительные амплитуды вертикальных перемещений при различной ориентировке оси максимального сжатия. В качестве исходных данных для построения модели использовались высотные отметки рельефа и границы крупных неоднородностей, которыми на данной территории являются гранито-гнейсовый купол и синформа, расположенные на острове Риеккалансари. Методика моделирования заключается в том, что на поверхность рельефа, построенную в формате «Grid», были нанесены контуры данных неоднородностей, обусловленных геологическим строением территории. С помощью модуля «Fracture modelling» определены относительные амплитуды вертикальных смещений при различной ориентировке главных нормальных осей напряжений. При про-

роения модели использовались высотные отметки рельефа и границы крупных неоднородностей, которыми на данной территории являются гранито-гнейсовый купол и синформа, расположенные на острове Риеккалансари. Методика моделирования заключается в том, что на поверхность рельефа, построенную в формате «Grid», были нанесены контуры данных неоднородностей, обусловленных геологическим строением территории. С помощью модуля «Fracture modelling» определены относительные амплитуды вертикальных смещений при различной ориентировке главных нормальных осей напряжений. При про-

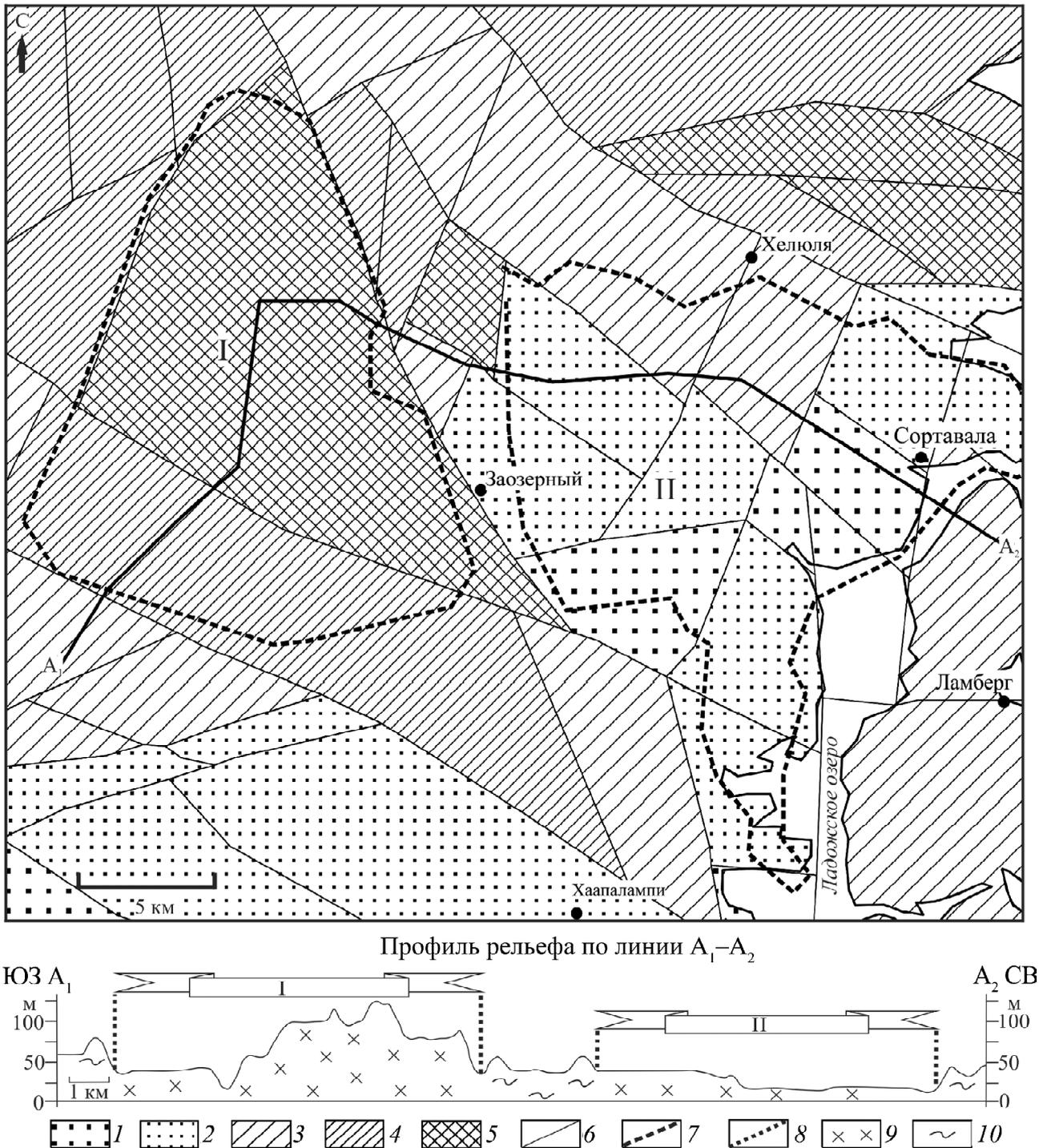


Рис. 4. Схема блоковой делимости района города Сортавала, составленная по данным анализа рельефа: 1 – максимальные высотные отметки блоков (м): 1 – 20–45, 2 – 45–65, 3 – 65–85, 4 – 85–105, 5 – 105–125; 6 – границы блоков; 7 – границы гранито-гнейсовых куполов Иокирантского (I) и Сортавальского (II) (по: [Кулаковский, Морозов, 2015]); 8 – границы гранито-гнейсовых куполов на профиле рельефа; 9 – гранито-гнейсы; 10 – породы ладожского комплекса

Fig. 4. Block divisibility scheme of the Sortavala town, based on the analysis of relief data: 1–5 – maximum block elevations (in meters): 1 – 20–45, 2 – 45–65, 3 – 65–85, 4 – 85–105, 5 – 105–125; 6 – block boundaries; 7 – boundaries of Iokiranta (I) and Sortavala (II) granite-gneiss domes (after: [Kulakovsky, Morozov, 2015]); 8 – boundaries of granite-gneiss domes on the relief profile; 9 – granite-gneiss; 10 – rocks of the Ladoga complex

ведении расчетов использовались следующие допущения: величины напряжений достаточно велики для образования новых разрывов малой протяженности, все границы неоднородностей непрерывны и вертикальны, перемещения по ним происходят до тех пор, пока величины напряжений не достигнут нулевых значений [Агибалов с соавт., 2017]. Поскольку неотектонические движения, происходящие в определенных полях напряжений, относятся к главным рельефообразующим процессам [Корчуганова, 2007], сопоставление полученных карт относительных амплитуд вертикальных перемещений с высотными отметками рельефа позволило сделать предположения об ориентировке главных нормальных осей напряжений на новейшем этапе.

Результаты исследований и их обсуждение.

Рассмотренные в данной работе куполовидные структуры можно разделить на две группы: к первой относятся гранито-гнейсовые купола Хавус и Коккасельский, отличающиеся концентрическими очертаниями в плане, а ко второй – Риекка, Сортавальский и Йокирантский, контуры которых имеют форму, близкую к треугольной. Структуры, объединенные в первую группу, выделяются в рельефе по повышенным высотным отметкам, центрбежному рисунку гидро-сети; к их границам приурочены крутые склоны и вертикальные уступы высотой до первых десятков метров. Исключением является юго-западная часть острова Хавус: высотные отметки в непосредственной близости от гранито-гнейсового купола достигают 70 м, в то время как максимальная высота купола составляет 80 м. Однако анализ высотных отметок выровненных площадок, выделенных на профиле рельефа, позволяет предположить, что в этой части острова купол приподнят на 10 м относительно межкупольного пространства (рис. 1). Данные площадки сформировались после последнего валдайского оледенения, завершившегося около 13 тыс. лет назад [Субетто, 2007]. Таким образом, гранито-гнейсовые купола Хавус и Коккасельский можно рассматривать как новейшие поднятия. Это предположение согласуется с ранее опубликованными в работе А.Д. Лукашова данными, согласно которым Коккасельский купол образует в новейшей структуре горст, обрамленный зонами повышенной трещиноватости [Лукашов, 1976]. Для обоих опорных участков характерна общая закономерность: на картах коэффициентов развития рельефа по характеру распределения данного параметра можно выделить несколько концентрических зон разного радиуса, имеющих общий центр. При этом радиус каждой последующей зоны в $\sqrt{2}$ раз больше радиуса предыдущей. Аналогичная закономерность была отмечена при изучении кольцевых разломов Хибинского массива [Ильченко, Сенчина, 2018].

Взаимосвязь между геологическим строением и рельефом в пределах двух других опорных участков имеет более сложный характер. На территории каждого участка выделяются две крупные неоднородности: гранито-гнейсовые купола Сортавальский и Йокирантский, с одной стороны, и купол Риекка и сопря-

женная с ним синформа, сложенная гнейсами ладожской серии – с другой. Эти морфоструктуры находят отражение в рисунке гидро-сети, границы куполов подчеркиваются вертикальными стенками и уступами. Гранито-гнейсовые купола Риекка и Йокирантский приподняты относительно сопряженных морфоструктур, расположенных восточнее (синформы и Сортавальского купола), и отличаются достаточно расчлененным рельефом, для которого характерны крутые склоны и вертикальные уступы высотой до первых десятков метров. Максимальная высота купола Риекка составляет 80 м, Йокирантского купола – 120 м, в то время как высотные отметки в пределах синформы достигают 50 м, а высота Сортавальского купола не превышает 60 м. Исходя из высотных отметок выровненных площадок, выделенных в южной части острова Риеккалансари, можно предположить, что синформа опущена на 30 м относительно гранито-гнейсового купола. В целом, выраженные как поднятия морфоструктуры отличаются от сопряженных относительно опущенных структур большими значениями средних высотных отметок, стандартных отклонений высот и усредненных коэффициентов развития рельефа, максимальных и средних значений кривизны поверхности рельефа, средними величинами крутизны склонов (табл. 1). Проведенные полевые исследования показали, что архейские гранито-гнейсы достаточно однородны в пределах рассматриваемого района, а слагающие синформу гранитизированные гнейсы ладожского комплекса макроскопически схожи с гранито-гнейсами фундамента. В этой связи представляется возможным сделать вывод о том, что отличия морфометрических параметров между относительно приподнятыми и опущенными структурами не связаны с различиями прочностных свойств пород. Таким образом, рассмотренные тектонические структуры по-разному проявляются в соразмерных им формах рельефа: гранито-гнейсовые купола Хавус, Коккасельский, Риекка, Йокирантский и расположенная на острове Риеккалансари синформа находят прямое отражение в рельефе, а Сортавальский купол – обратное. Аналогичная особенность проявляется в региональном масштабе на территории всего Балтийского щита [Спиридонов, 1978].

С помощью компьютерного моделирования установлено, что максимальные значения коэффициентов корреляции Пирсона между рассчитанными относительными амплитудами вертикальных перемещений и высотными отметками рельефа достигаются в обстановке субгоризонтального сжатия, ось которого ориентирована в северо-западных румбах. Это направление согласуется с общими представлениями о северо-западном сжатии Фенноскандии, которое подтверждается решениями фокальных механизмов очагов землетрясений на сопредельной территории юго-восточной Финляндии [Slunga, 1991; Uski et al., 2003]. Оно может быть обусловлено гляциоизостатическим поднятием Балтийского щита [Keiding et al., 2015] и спредингом в северной части Атлантического океана. Величина коэффициента корреляции между рассчитанными относительными

Морфометрические параметры рельефа куполовидных структур Иокирантской, Сортавальской, Риекка и синформы, расположенной в юго-восточной части острова Риеккалансари

Сопоставляемые морфометрические параметры	Иокирантский купол	Сортавальский купол	Купол Риекка	Синформная структура, сопряженная с куполом Риекка
Максимальные высотные отметки (м)	120	60	80	50
Средние высотные отметки (м)	61	20	46	38
Медианные значения высотных отметок (м)	60	24	44	38
Стандартные отклонения высотных отметок (м)	23	12	18	9
Средние значения коэффициентов развития рельефа	0,76	0,73	0,87	0,79
Максимальные значения кривизны поверхности рельефа	0,0117	0,0115	0,13	0,072
Средние значения кривизны поверхности рельефа	169×10^{-6}	165×10^{-6}	53×10^{-4}	47×10^{-7}
Медианные значения кривизны поверхности рельефа	$-10,257 \times 10^{-5}$	$-5,673 \times 10^{-5}$	4×10^{-3}	3×10^{-3}
Средняя крутизна склонов (град.)	1,3	0,8	3,23	2,03

амплитудами вертикальных перемещений и высотными отметками рельефа для территории острова Хавус составляет 0,37 (азимут простирания оси максимального сжатия 130°), для района Коккасельского купола – 0,29 (азимут простирания оси сжатия 175°), для района купола Риекка – 0,45 (азимут простирания оси сжатия 100°), для Сортавальского и Иокирантского куполов – 0,32 (азимут простирания оси сжатия 160°). Различная ориентировка оси максимального сжатия связана, по-видимому, со сложным характером перераспределения напряжений под влиянием крупных неоднородностей, обусловленных геологическим строением территории.

Выводы:

– гранито-гнейсовые купола Хавус и Коккасельский, имеющие субизометричную форму, выраже-

ны в рельефе как поднятия, в пределах которых по характеру распределения коэффициента развития рельефа выделяется серия закономерно расположенных концентрических линеаментов;

– Иокирантский купол представляет собой область поднятия, к которому прилегает область опускания, приуроченная к Сортавальскому куполу. Аналогичным образом в рельефе отражены купол Риекка (приподнятый блок) и сопряженная с ним синформа (опущенный блок);

– использование метода компьютерного моделирования позволило сделать вывод о том, что неотектоническая активизация куполовидных структур может происходить в обстановке северо-западного сжатия и рассматриваться как один из множества факторов рельефообразования.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00359.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авенариус И.Г. Морфоструктурный анализ при изучении культурного и природного наследия Западно-Арктического региона России. Берлин: Paulsen, 2008. 188 с.

Агибалов А.О., Зайцев В.А., Сенцов А.А., Девяткина А.С. Оценка влияния современных движений земной коры и активизированного в новейшее время докембрийского структурного

плана на рельеф Приладожья (юго-восток Балтийского щита) // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 791–807.

Амантов А.В., Амантова М.Г. Моделирование послеледникового развития района Ладожского озера и восточной части Финского залива // Региональная геология и металлогения. 2017. № 6. С. 5–14.

Бискэ Г.С. Четвертичные отложения и геоморфология Карелии. Петрозаводск: Гос. изд. Карельской АССР, 1959. 321 с.

Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления / Под ред. Н.В. Шарова. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2004. 353 с.

Государственная геологическая карта 1:200 000. Листы Р-35-XXIV, Р-36-XIX / Ред. Богданов Ю.Б. СПб.: ГГУП «СФ Минерал», 2004.

Григорьева Л.В., Шинкарев Н.Ф. Условия образования купольных структур в Приладожье // Изв. АН СССР. Серия геологическая. 1981. № 3. С. 41–50.

Ильченко В.Л., Сенчина Н.П. Волновые признаки развития систем тектонических нарушений вокруг структур центрального типа в вариациях форм рельефа и геохимических данных // Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии. Материалы I Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2018. Т. 1. С. 230–234.

Корчуганова Н.И. Новейшая тектоника с основами современной геодинамики. Методическое руководство. М.: Геокарт, ГЕОС, 2007. 354 с.

Кулаковский А.Л., Морозов Ю.А., Смольская А.И. Стресс-метаморфизм и стресс-метаморфиты в докембрии Приладожья // Тр. КарНЦ РАН. 2015. № 7. С. 19–35.

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

Лысова В.Ф. Морфометрия и неотектоника Южного Тимана. Дис. ... канд. геол.-минерал. н. Сыктывкар, 2004. 232 с.

Морозов Ю.А. О роли транспрессии в формировании структуры Балтийского щита // Геотектоника. 1999. № 4. С. 37–51.

Морозов Ю.А., Гафт Д.Е. О природе гранито-гнейсовых куполов Северного Приладожья // Структура и петрология

докембрийских комплексов. М.: Изд-во Института физики Земли АН СССР, 1985. С. 3–121.

Полянский О.П., Реввердатто В.В., Бабичев А.В., Свердлова В.Г. Механизм подъема магмы через «твердую» литосферу и связь мантийного и корового диапиризма: численное моделирование и геологические примеры // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 6. С. 1073–1091.

Симонов Ю.Г. Морфометрический анализ рельефа. М.; Смоленск: Изд-во СГУ, 1998. 272 с.

Симонов Ю.Г. Объяснительная морфометрия рельефа. М.: ГЕОС, 1999. 251 с.

Спиридонов А.И. Геоморфология европейской части СССР. М.: Высшая школа, 1978. 335 с.

Субетто Д.А. История формирования Ладожского озера и его соединения с Балтийским морем // Общество. Среда. Развитие (Тетра Humana). 2007. № 1. С. 111–120.

Судовиков Н.Г., Глебовицкий В.А., Сергеев А.С., Петров В.П., Харитонов А.Л. Геологическое развитие глубинных зон подвижных поясов (Северное Приладожье). Л.: Наука, 1970. 227 с.

Bowes D.R., Halden N.M., Koistinen T.J., Park A.F. Structural features of basement and cover rocks in the eastern Svecocarellides, Finland // Eds.: A. Kröner, R. Greiling. Precambrian Tectonics Illustrated. Schweizerbart Science Publishers. Stuttgart. Germany. 1984. P. 147–171.

Keiding M., Kreemer C., Lindholm C.D., Gradman S., Olesen O., Kierulf H.P. A comparison of strain rates and seismicity for Fennoscandia: depth dependency of deformation from glacial isostatic adjustment // Geophys. J. Int. 2015. V. 202. P. 1021–1028.

Slunga R.S. The Baltic shield earthquakes // Tectonophysics. 1991. V. 189. № 1–4. P. 323–331.

Uski M., Hyyönien T., Korja A., Airo M-L. Focal mechanisms of three earthquakes in Finland and their relation to surface faults // Tectonophysics. 2003. V. 363. P. 141–157.

Поступила в редакцию 05.03.2018

Принята к публикации 21.05.2018

A.O. Agibalov¹, A.A. Sentsov², V.A. Zaitsev³

PROJECTION OF GRANITE-GNEISS DOMES OF THE NORTHERN LADOGA LAKE REGION IN MODERN RELIEF

We analyzed the relief of granite-gneiss domes Havus, Kokkasel'skij, Riekka, Sortaval'skij and Iokirantskij in the Northern Ladoga Lake region. It is established, that the subsometric Havus and Kokkasel'skij granite-gneiss domes are projected in relief as elevations; within them a series of concentric lineaments is revealed according to the pattern of the distribution of relief development coefficients. Domes, which have a more complicated shape are both areas of elevation (Riekka, Iokirantskij), and t heregions of subsidence (Sortaval'skij dome). Computer modeling suggested that complicated relationships between the geological structures and modern relief are to a large extent conditioned by neotectonic activation of Archean domes under the northwest compression.

Key words: granite-gneiss domes, the Ladoga Lake region, computer modeling.

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Fundamental Research (project № 18-35-00359).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Dynamic Geology, postgraduate student; *e-mail:* Agibalo@yandex.ru

² The Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Laboratory of Seismotectonics and Seismic Microzonation, Scientific Researcher; *e-mail:* alekssencov@yandex.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Dynamic Geology, Head of the Section of Geocatastrophe Research, PhD. in Geology and Mineralogy; *e-mail:* v.zaitsev@mail.ru

REFERENCES

- Agibalov A.O., Zaytsev V.A., Sentsov A.A., Devyatkina A.S.* Assessment of the influence of modern crustal movements and the recently activated Precambrian structural plan on the relief of the Lake Ladoga region (the southeastern Baltic Shield) // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2017. V. 8. № 4. P. 791–807.
- Amantov A.V., Amantova M.G.* Modelirovanie poslednikovogo razvitiya rajona Ladozhskogo ozera i vostochnoj chasti Finskogo zaliva [Modeling of postglacial development of the Ladoga Lake and eastern part of the Gulf of Finland] // *Region. geologiya i metallogeniya*. 2017. № 6. P. 5–14 (in Russian).
- Avenarius I.G.* Morfostrukturnyj analiz pri izuchenii kul'turnogo i prirodnogo naslediya Zapadno-Arkticheskogo regiona Rossii [Morphostructural analysis in studying the cultural and natural heritage of the Western Arctic region of Russia]. Berlin: Paulsen, 2008. 188 p. (in Russian).
- Biskeh G.S.* Chetvertichnye otlozheniya i geomorfologiya Karelii [Quaternary deposits and geomorphology of Karelia]. Petrozavodsk: Gosudarstvennoe izdatel'stvo Karel'skoj ASSR, 1959. 321 p. (in Russian).
- Bowes D.R., Halden N.M., Koistinen T.J., Park A.F.* Structural features of basement and cover rocks in the eastern Sveccarelid, Finland / Eds.: A. Kröner, R. Greeling // *Precambrian Tectonics Illustrated*, Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, Germany, 1984. P. 147–171.
- Glubinnoe stroenie i sejsmichnost' Karel'skogo regiona i ego obramleniya [Deep structure and seismicity of the Karelian region and its margins] / Ed. by N.V. Sharov. Petrozavodsk: Karel'skij nauchnyj centr RAN, 2004. 353 p. (in Russian).
- Grigorieva L.V., Shinkarev N.F.* Usloviya obrazovaniya kupol'nyh struktur v Priladozh'e [Conditions for formation of dome structures in the Ladoga Lake region] // *Izvestiya AN SSSR. Seriya Geologicheskaya*. 1981. № 3. P. 41–50 (in Russian).
- Il'chenko V.L., Senchina N.P.* Volnovye priznaki razvitiya sistem tektonicheskikh narushenij vokrug struktur central'nogo tipa v variacijah form rel'efa i geohimicheskikh dannyh [Wave signs of the development of tectonic disturbance systems around the structures of the central type in variations of relief forms and geochemical data] // *Problemy tektoniki i geodinamiki zemnoj kory i mantii. Materialy L. Tektonicheskogo soveshhanija*. Moscow: GEOS, 2018. V. 1. P. 230–234 (in Russian).
- Keiding M., Kreemer C., Lindholm C.D., Gradman S., Olesen O., Kierulf H.P.* A comparison of strain rates and seismicity for Fennoscandia: depth dependency of deformation from glacial isostatic adjustment // *Geophys. J. Int.* 2015. V. 202. P. 1021–1028.
- Korchuganova N.I.* Novejshaja tektonika s osnovami sovremennoj geodinamiki. Metodicheskoe rukovodstvo. [The recent tectonics with the basics of modern geodynamics. Methodical guide]. Moscow: Geokart, GEOS, 2007. 354 p. (in Russian).
- Kulakovskiy A.L., Morozov Yu. A., Smul'skaya A.I.* Stress-metamorphism and stress-metamorphites in Precambrian of the Ladoga region // *Proceedings of the Karelian Research Center of RAS*. 2015. № 4. P. 19–35.
- Lukashov A.D.* Novejshaja tektonika Karelii [The recent tectonics of Karelia]. Leningrad: Nauka, 1976. 109 p. (in Russian).
- Lysova V.F.* Morfometrija i neotektonika Juzhnogo Timana. Dis. ... kand. geol.-mineral. n. [Morphometry and neotectonics of Southern Timan. Thesis for the degree of PhD. in Geology and Mineralogy]. Syktyvkar, 2004. 232 p. (in Russian).
- Morozov Yu.A.* O roli transpressii v formirovanii struktury Baltijskogo shhita [On the role of transpression in the forming of the structure of the Baltic Shield] // *Geotektonika*. 1999. V. 33. № 4. P. 302–313 (in Russian).
- Morozov Yu.A., Gaft D.E.* O prirode granito-gnejsovyh kupolov Severnogo Priladozh'ja [On the nature of granite-gneiss domes in the Northern Ladoga Lake region] // *Structure and petrology of Precambrian complexes*. Moscow: Izdatel'stvo Instituta Fiziki Zemli AN SSSR, 1985. P. 3–121 (in Russian).
- Polyansky O.P., Reverdatto V.V., Babichev A.V., Sverdlova V.G.* The mechanism of magma ascent through the solid lithosphere and relation between mantle and crustal diapirism: numerical modeling and natural examples // *Geology and Geophysics*. 2016. V. 57. № 6. P. 843–857.
- Simonov Yu.G.* Morfometricheskij analiz rel'efa [Morphometric analysis of relief]. Moscow-Smolensk: Izdatel'stvo SGU, 1998. 272 p. (in Russian).
- Simonov Yu.G.* Ob"yasnitel'naya morfometrija rel'efa [Explanatory morphometry of relief]. Moscow: GEOS, 1999. 251 p. (in Russian).
- Slunga R.S.* The Baltic shield earthquakes // *Tectonophysics*. 1991. V. 189. № 1–4. P. 323–331.
- Spiridonov A.I.* Geomorfologiya evropejskoj chasti SSSR [Geomorphology of the European part of the USSR]. Moscow: Vysshaya shkola, 1978. 335 p. (in Russian).
- State geological map (scale 1:200 000). Sheets P-35-XXIV, P-36-XIX / Ed. Yu.B. Bogdanov. St. Petersburg: Mineral, 2004.
- Subetto D.A.* Istorija formirovanija Ladozhskogo ozera i ego soedinenija s Baltijskim morem [History of the formation of the Ladoga Lake and its connection with the Baltic Sea] // *Obshhestvo. Sreda. Razvitie (Terra Humana)*. 2007. № 1. P. 111–120 (in Russian).
- Sudovikov N.G., Glebovitsky V.A., Sergeev A.S., Petrov V.P., Kharitonov A.L.* Geologicheskoe razvitie glubinnyh zon podvizhnyh pojasov (Severnoe Priladozh'e) [Geological Development of Deep Zones in Mobile Belts (the Northern Ladoga Lake region)]. Leningrad: Nauka, 1970. 227 p. (in Russian).
- Uski M., Hyvönen T., Korja A., Airo M-L.* Focal mechanisms of three earthquakes in Finland and their relation to surface faults // *Tectonophysics*. 2003. V. 363. P. 141–157.

Received 05.03.2018

Accepted 21.05.2018