

doi: 10.24412/2687-1092-2023-10-292-298



## КОМПЛЕКСНЫЕ ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ, ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЕ И ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ОЗЕРЕ СРЕДНЕЕ ЛУВЕНЬГСКОЕ (ЮГО-ЗАПАД КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА)

✉ Шварев С.В.<sup>1,2</sup>, Бондарь И.В.<sup>2,1</sup>, Гуринов А.Л.<sup>1</sup>, Королева А.О.<sup>2,1</sup>, Луговой Н.Н.<sup>3,1</sup>,  
Яковенко А.К.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия

✉ s.v.shvarev@gmail.com

Изучается территория, обрамляющая озеро Среднее Лувеньгское, а также его дно. Используются методы геолого-геоморфологических описаний, эхолотных промеров глубин, аэрофотосъёмки с БПЛА, георадарного профилирования на суше и акватории, катакластический анализ разрывных смещений и структурно-парагенетический анализ геологических стресс-индикаторов. Впервые составлена батиметрическая карта данного озера. Проведённый комплекс исследований позволяет сделать вывод о существовании здесь взаимосвязанной блоково-разломной системы, выраженной в разрывах кристаллического фундамента, деформациях рыхлых отложений и строении поверхности, свидетельствуя об унаследованных смещениях по разломам до позднеледниковья и, вероятно, голоцена. Установлено, что контрастность рельефа, дифференцированность разреза в пределах дна озера и выявленные стресс-индикаторы в береговой зоне свидетельствуют о расположении вдоль озерной котловины осевой части разломной зоны с максимальными амплитудами в южной части котловины.

Ключевые слова: батиметрическая карта, блоково-разрывная тектоника, геологические стресс-индикаторы, георадиолокация озера, сейсмотектонические наблюдения, сейсмодислокации, тектонические деформации, Кольский полуостров

**Введение.** Озеро Среднее Лувеньгское расположено в сквозной долине, меридионально рассекающей северные отроги низкогорного массива Кандалакшских Тундр в юго-западной части Кольского полуострова. Озерная котловина имеет тектоническое происхождение и связана с пересекающим горный массив с ССЗ на ЮЮВ крупным тектоническим нарушением, прослеживающимся в виде единой структуры от южного побережья озера Бабинская Имандра до западного побережья Колвицкого озера, замыкаясь в районе основания полуострова Турий [Шварев и др., 2021]. В районе котловины озера были обнаружены сейсмодислокации разного типа на суше (тектонические уступы, рвы, обвалы) и в акватории близлежащего озера Уросиха (нарушенный горизонт в озерных отложениях) [Николаева, Евзеров, 2018; Николаева, Лаврова, 2021], а также установлено наличие долгоживущего тектонического нарушения с признаками новейшего обновления [Колодяжный и др., 2019]. Эти предварительные данные определили данный район как перспективный для постановки комплексных исследований с применением геолого-геоморфологических, тектонофизических и геофизических методов с целью определения пространственно-кинематических параметров активного тектонического разлома, установления его выраженности в рельефе, рыхлых отложениях и скальном фундаменте с оценкой взаимосвязи деформаций разного типа и их унаследованности. Необходимым условием при этом является непрерывное прослеживание деформационных структур на суше и в пределах акватории. Однако, за всё время предыдущих исследований результатов съёмки рельефа дна озера Среднего Лувеньгского не опубликовано, и даже его максимальная глубина оставалась неизвестной [Кашулин и др., 2012].

Для решения поставленных задач применено совместное георадиолокационное профилирование (дополняемое нивелирным профилированием на суше), батиметрическая и аэрофотосъемка с построением цифровых моделей дна озера и прибрежной суши, сопровождаемые исследованием и параметризацией сейсмогенных деформаций на ключевых участках и исследованием кинематики разрывных нарушений и тектонической напряженности в скальных массивах.

**Методика. Геофизические исследования.** Геофизические исследования проводились с использованием метода георадиолокации, основанного на излучении импульсов электромагнитных волн и регистрации сигналов, отраженных от различных объектов исследуемой среды. В данном случае речь идет о границах раздела сред с различной диэлектрической проницаемостью. Георадиолокационная съемка проводилась при помощи георадара ОКО-3 антеннами 100, 250 и 400/900 МГц. В процессе экспедиционных работ в районе оз. Среднее Лувеньгское впервые проведена георадиолокационная съемка на суше и в пределах акваторий (рис. 1). Цель геофизической съемки – определение условий залегания четвертичных отложений, их соотношения с рельефом, а также взаимоотношений глубинных и поверхностных структур, выявление пространственной связи блоковой структуры кристаллического фундамента и деформаций в рельефе и рыхлых отложениях.

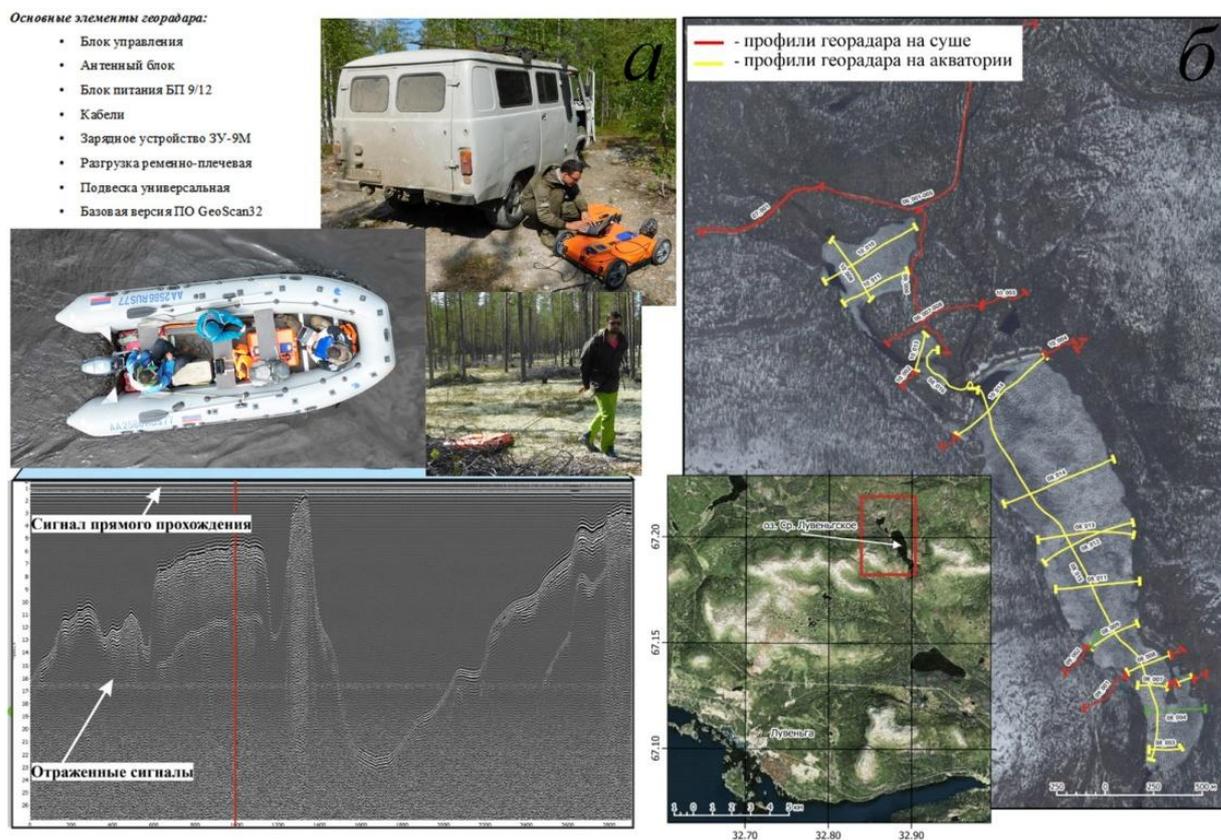


Рис.1. Георадиолокационные исследования в районе оз. Среднее Лувеньгское: а) элементы технологии и методики георадиолокационных исследований на суше и в акватории; б) георадиолокационные профили (красным – на суше, желтым – в акватории)

**Тектонофизические исследования.** Для реконструкции напряженно-деформированного состояния земной коры были применены тектонофизические методы, основанные на полевом изучении геологических стресс-индикаторов. Применение метода *катакластического анализа (ККА) разрывных смещений* [Ребецкий и др., 2017] опирается на результаты замеров зеркал скольжения в виде матрицы данных, по которой производится реконструкция положения осей главных напряжений в автоматическом режиме с использованием программы STRESSgeol. В *структурно-парагенетическом*

методом (СПМ) используются не только пространственная ориентировка геологических стресс-индикаторов, но и их описание, структура, строение и тому подобное [Расцветаев, 1987]. Важнейшим при анализе является выявление и исследование геомеханических семейств дизъюнктивных нарушений. Это семейство составляет вся совокупность дизъюнктивов определенного ранга, сформированных или активизированных в данном объеме деформируемой геологической среды в результате единого процесса тектонической деформации.

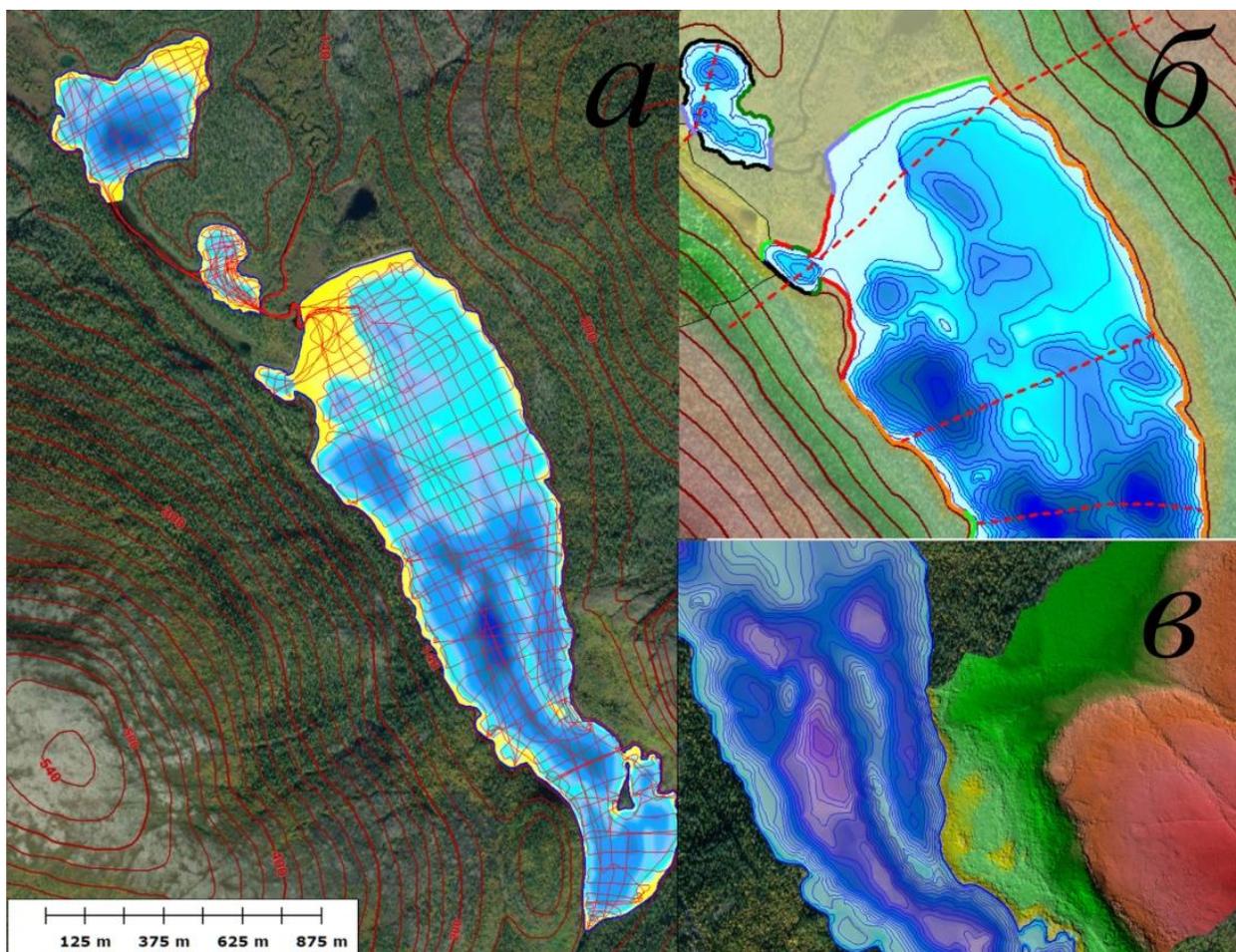


Рис. 2. Построение совмещенных цифровых моделей: а) сетка галсов батиметрической съемки в акватории оз. Среднее Лувенгское; б – фрагмент батиметрической карты с расположением георадарных профилей; в) фрагмент совмещенной цифровой модели рельефа на основе данных БПЛА-аэрофотосъемки, FABDEM и батиметрической съемки.

**Геоморфологические исследования.** Для оценки выраженности в рельефе блоково-разрывной тектоники и пространственной увязки геофизических и тектонофизических данных выполнены работы по построению единой цифровой модели дна озера и окружающей суши. Батиметрическая съемка рельефа дна озера проведена с использованием эхолота Garmin Echomap plus 72sv по сетке ортогонально сопряженных галсов со средним шагом 30-40 м, позволившая построить цифровую модель дна озера с разрешением 1 м (рис.2). Суммарная длина промерных галсов около 80 км. Для прибрежной территории цифровая модель построена по результатам аэрофотосъемки с квадрокоптера (DJI Phantom 4 Pro v.2.0), совмещенной с ЦМР FabDEM. По геофизическим профилям осуществлялись геолого-геоморфологические и сейсмотектонические наблюдения с фиксацией параметров видимых сейсмодетекций различного типа.

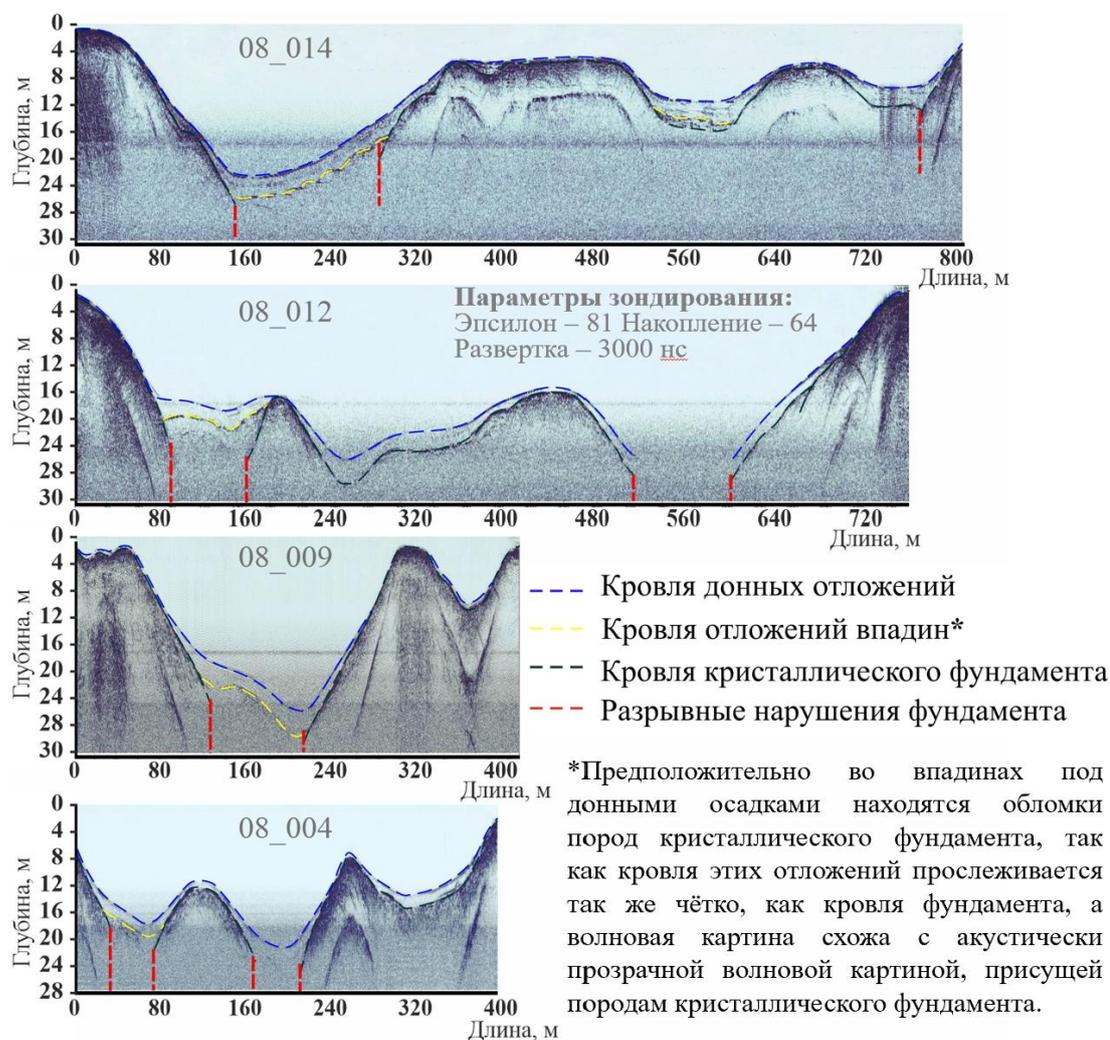


Рис. 3. Интерпретация георадиолокационных данных на оз. Среднее Лувенгское.

**Результаты исследований.** Впервые составлена батиметрическая карта озера Среднее Лувенгское и выявлена его максимальная глубина – 33,3 м (см. рис. 2). Помимо этого, выполнены промеры и составлены батиметрические карты близлежащих озер, соединенных со Средним Лувенгским короткими протоками – оз. Уросиха и оз. Рига-Ламбина, их максимальные глубины - 29,2 м и 12 м, соответственно

В ходе работ удалось выполнить несколько десятков георадарных профилей как на суше, так и в акваториях озер (Рис.1,3). Для полученных радарограмм в ПО CartScan («Логис-Геотех») была проведена обработка по стандартной методике [Старовойтов, 2008]. Интерпретация радарограмм выполнена на основе анализа волновой картины по методике [Старовойтов, 2008]. По наличию высокоамплитудных отражений от границ и характеру волновых картин было выделено три основных георадиолокационных комплекса: А - донные стратифицированные отложения (слоистая волновая картина); Б - нестратифицированные отложения впадин (хаотическая волновая картина); В - кристаллический фундамент (акустически прозрачная волновая картина). Исследование пространственного рисунка разрезов и соотношений выделенных комплексов позволило выделить разрывные нарушения в породах кристаллического фундамента по следующим признакам [Родионов, 2018; Ercoli, 2021]: а) разрывы и вертикальное смещение осей синфазности отраженных волн; б) резкое изменение наклонов осей синфазности; в) резкое падение амплитуды отражений; г) гиперболы и полугиперболы (от точек разрыва).

Разрывные нарушения наблюдаются на протяжении всего озера Среднее Лувенгское и приурочены в основном к глубоким впадинам (рис. 3). Четвертичные

отложения донных осадков прослеживаются во впадинах, образованных предположительно сейсмическими событиями, в большинстве своем повторяя кровлю фундамента. На склонах и возвышенных участках фундамента слой донных отложений минимален.

Реконструкция главных осей напряжения методом катакластического анализа удалась для 6 точек наблюдения (рис. 4), расположенных как в восточном, так и в западном борту разлома. Преобладает ориентировка оси максимального сжатия северо-восточной ориентировки, однако, угол погружения оси в некоторых точках наблюдения пологий, а в других – крутой. Это говорит о разных геодинамических типах в каждой отдельной точке. С помощью структурно-парагенетического метода построено 9 круговых диаграмм. Анализ информации и взаимоотношения всех зеркал скольжения, а также небольших разрывных нарушений, отрывов и других геологических стресс-индикаторов позволил выявить преобладающую для данного района ориентировку оси максимального сжатия – северо-восточную.

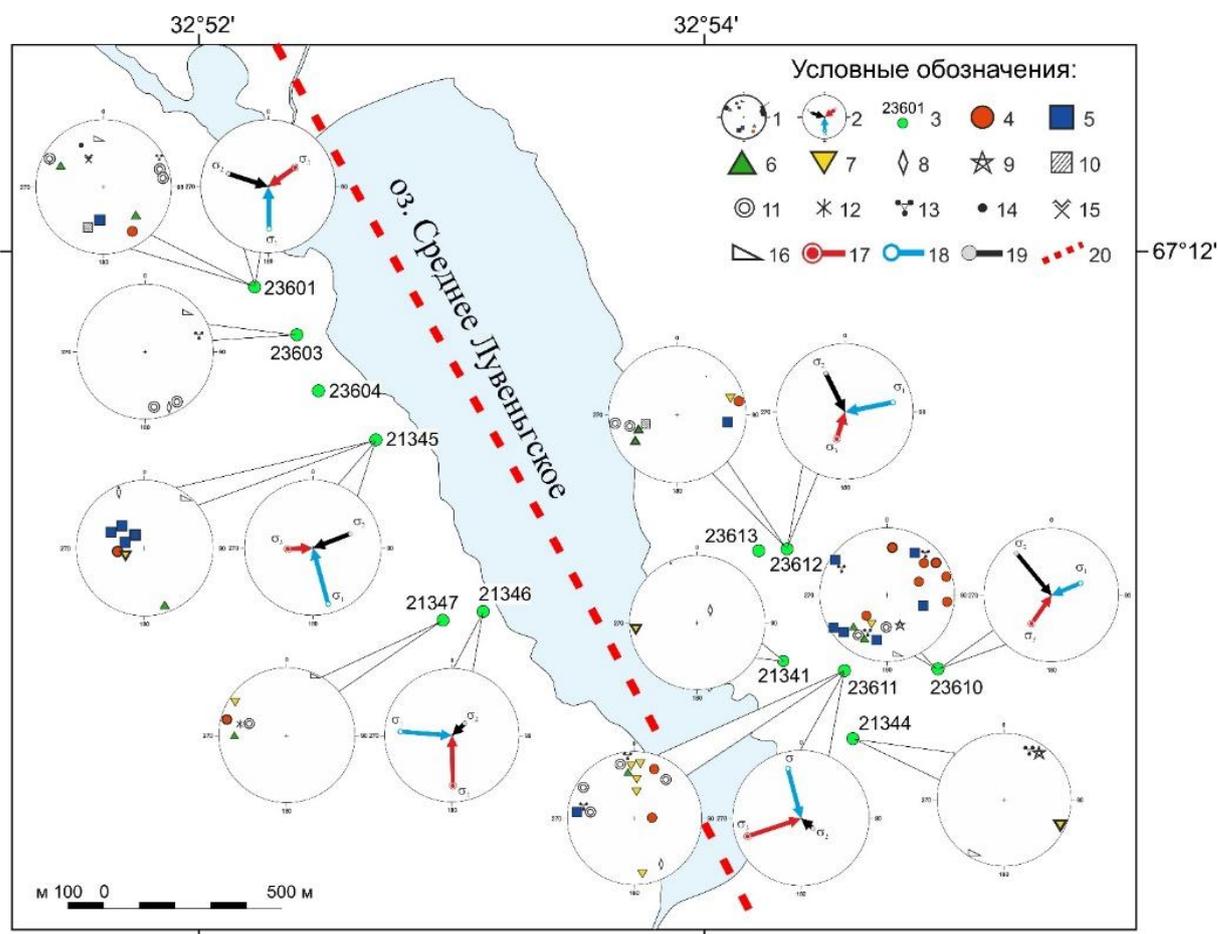


Рис. 4. Карта точек наблюдения с результатами построений структурно-парагенетическим методом и расчетами методом катакластического анализа. Построения на верхнюю полусферу. 1 – круговая диаграмма с полюсами плоскостей геологических стресс-индикаторов, построенная с помощью СПМ; 2 – круговая диаграмма с результатами расчета ККМ; 3 – точки наблюдения; 4-16 – полюса плоскостей: 4-9 – зеркала скольжения: 4 – взбросовой кинематики, 5 – сбросовой, 6 – праводвиговой, 7 – леводвиговой, 8 – неопределенной кинематики горизонтального смещения, 9 – неопределенной кинематики вертикального смещения; 10 - 14 – прочих геологических стресс-индикаторов: 10 – разрыв сбросовой кинематики, 11 – зона дробления, 12 – жила, 13 – система трещин, 14 – трещина; 15-16 – элементы залегания: 15 – сланцеватости, 16 – экспозиции склона; 17-19 – оси главных напряжений: 17 – максимального сжатия, 18 – максимального растяжения, 19 – промежуточная; 20 – Имандра-Колвицкий разлом.

Совместный анализ геоморфологических, геофизических и тектонофизических данных позволяет сделать некоторые общие выводы:

- 1) В пределах акватории озера Среднее Лувеньгское и прилегающих территорий наблюдается взаимосвязанная блоково-разломная система, выраженная в разрывах кристаллического фундамента, деформациях рыхлых отложений и строении поверхности, свидетельствуя об унаследованных смещениях по разломам до позднеледниковья и, вероятно, голоцена.
- 2) Контрастность рельефа, дифференцированность разреза в пределах дна озера и выявленные стресс-индикаторы в береговой зоне свидетельствуют о расположении вдоль озерной котловины осевой части разломной зоны с максимальными амплитудами в южной части котловины.

**Благодарности.** Работы выполнены при финансовой поддержке РФФ, проект 23-27-00205

## ЛИТЕРАТУРА

*Шварев С.В., Николаева С.Б., Королева А.О.* Морфологические проявления постледниковой сейсмической активности Имандра-Колвицкого активного разлома в Лувеньгской очаговой зоне (Мурманская область) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2021. Т. 18. С. 425–429. doi:10.31241/FNS.2021.18.080

*Николаева С.Б., Евзеров В.Я.* К геодинамике Кольского региона в позднем плейстоцене и голоцене: обзор и результаты исследований // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2018. № 1. С. 5–14. doi: 10.17308/geology.2018.1/1386

*Николаева С.Б., Лаврова Н.Б.* Палеоклиматические и природно-динамические изменения окружающей среды в голоцене на юге Мурманской области: результаты изучения донных осадков озер в районе Лувеньгских тундр) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2021. Т. 18. С. 310–315. doi:10.31241/FNS.2021.18.058

*Колодяжный С.Ю., Балуев А.С., Зыков Д.С.* Структура и эволюция северо-запада Беломорско-Северодвинской зоны сдвига в позднем протерозое и фанерозое (Восточно-Европейская платформа) // Геотектоника. 2019. №1. С. 62-86. doi: 10.31857/S0016-853X2019162-86

*Кашулин Н.А., Сандимиров С.С., Даувальтер В.А., Кудрявцева Л.П., Терентьев П.М., Денисов Д.Б., Вандыш О.И., Валькова С.А.* Аннотированный экологический каталог озер Мурманской области: юго-восточная часть (бассейн Белого моря) Апатиты, Изд-во Кольского научного центра РАН, 2012. Ч.1. 221 с.

*Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В.* От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы. ГЕОС Москва. 2017. 225 с.

*Расцветаев Л.М.* Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений // Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. М.: ГИН АН СССР. 1987. С. 173–235.

*Старовойтов А.В.* Интерпретация георадиолокационных данных. Учебное пособие – М.: Издательство МГУ, 2008, 192 с.

*Родионов А.И., Николаева С.Б., Рязанцев П.А.* Оценка возможностей георадиолокации при изучении сейсмогенных нарушений и деформаций в донных осадках (на примере озера Уполокшское, С-В Фенносканд. щита) // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 4. С. 1189-1203. doi: 10.5800/GT-2018-9-4-0390

*Ercoli M., Cirillo D., Pauselli C., Jol H.M., Brozzetti F.* Ground-penetrating radar signature of Quaternary faulting: a study from the Mt. Pollino region, southern Apennines, Italy // Solid Earth. 2021. Vol. 12. Is. 11. P. 2573–2596. doi: 10.5194/se-12-2573-2021

## COMPLEX GEOLOGICAL, GEOMORPHOLOGICAL, TECTONOPHYSICAL AND GEOPHYSICAL STUDIES ON LAKE SREDNEE LUVENSKOYE (SOUTHWEST OF THE KOLA PENINSULA)

Shvarev S.V.<sup>1,2</sup>, Bondar I.V.<sup>2,1</sup>, Gurinov A.L.<sup>1</sup>, Koroleva A.O.<sup>2,1</sup>, Lugovoy N.N.<sup>3,1</sup>, Yakovenko A.K.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>O.Y.Schmidt Institute of Earth Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The territory surrounding Lake Srednee Luvengskoye, as well as its bottom, is being studied. The methods of geological and geomorphological descriptions, depth sounder measurements, aerial photography from UAVs, georadar profiling on land and water areas, cataclastic analysis of discontinuous displacements and structural paragenetic analysis of geological stress indicators were used. For the first time, a bathymetric map of this lake has been compiled. The conducted complex of studies allows us to conclude that there is an interconnected block-fault system here, expressed in fractures of the crystalline basement, deformations of loose sediments and surface structure, indicating inherited displacements along the faults before the Late Glacial and, probably, the Holocene. It was found that the contrast of the relief, the differentiation of the section within the lake bottom and the identified stress indicators in the coastal zone indicate the location of the axial part of the fault zone along the lake basin with maximum amplitudes in the southern part of the basin.

Keywords: *bathymetric map, block-discontinuous tectonics, geological stress indicators, GPR-profiling of the lake, seismotectonic observations, seismic dislocations, tectonic deformations, Kola Peninsula*

## REFERENCES

- Shvarev S.V., Nikolaeva S.B., Koroleva A.O. Morphological manifestations of post-glacial seismic activity of the Imandra-Kolvitsky active fault in the Luvenga focal zone (Murmansk region) // Proceedings of the Fersman scientific session of the State Institute of the KSC RAS. 2021, vol. 18, pp. 425–429. doi:10.31241/FNS.2021.18.080
- Nikolaeva S.B., Evzerov V.Ya. On the geodynamics of the Kola region in the Late Pleistocene and Holocene: review and research results // Vestnik VSU. Series: Geology. 2018. No. 1. P. 5–14. doi: 10.17308/geology.2018.1/1386
- Nikolaeva S.B., Lavrova N.B. Paleoclimatic and natural-dynamic changes in the environment in the Holocene in the south of the Murmansk region: results of studying bottom sediments of lakes in the Luvenga tundra region) // Proceedings of the Fersman scientific session of the State Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2021, vol. 18, pp. 310–315. doi:10.31241/FNS.2021.18.058
- Kolodyazhnyi S.Y., Baluev A.S., Zykov D.S. Structure and evolution of the Belomorian–Severodvinsk shear zone in the Late Proterozoic and Phanerozoic, East European platform // Geotectonics. 2019. Vol. 53. № 1. P. 60–83. doi: 10.1134/S0016852119010047
- Kashulin N.A., Sandimirov S.S., Dauwalter V.A., Kudryavtseva L.P., Terentyev P.M., Denisov D.B., Vandysh O.I., Valkova S.A. Annotated ecological catalog of lakes in the Murmansk region: southeastern part (White Sea basin) Apatity, Publishing House of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2012. Part 1. 221 p.
- Rebetsky Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V. From slip surfaces to tectonic stresses. Methods and algorithms. GEOS Moscow. 2017. 225 p.
- Rastsvetaev L.M. Paragenetic method of structural analysis of disjunctive tectonic disturbances // Problems of structural geology and physics of tectonic processes. M.: GIN AN USSR. 1987. pp. 173–235.
- Starovoitov A.V. Interpretation of ground penetrating radar data. Textbook - M.: Moscow State University Publishing House, 2008, 192 p.
- Rodionov A.I., Nikolaeva S.B., Ryazantsev P.A. Evaluation of GPR capabilities in the study of seismogenic faulting and deformation in the bottom sediments of Lake Upoloksha (northeast of the Fennoscandian shield) // Geodynamics and Tectonophysics. 2018. Vol. 9. No. 4. P. 1189–1203. doi: 10.5800/GT-2018-9-4-0390
- Ercoli M., Cirillo D., Pauselli C., Jol H.M., Brozzetti F. Ground-penetrating radar signature of Quaternary faulting: a study from the Mt. Pollino region, southern Apennines, Italy // Solid Earth. 2021. Vol. 12. Is. 11. P. 2573–2596. doi: 10.5194/se-12-2573-2021