

УДК 55(1/9)

А.О. Агibalов¹, В.А. Зайцев², А.А. Сенцов³, Е.А. Мануилова⁴, А.В. Полещук⁵

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ НА РЕЛЬЕФ КОТЛОВИН ЛАДОЖСКОГО И ОНЕЖСКОГО ОЗЕР

*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»,**1199991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1**ФГБУН «Геологический институт РАН», 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 1**Schmidt Earth Physics Institute RAS, 123242, Moscow, Bol'shaya Gruzinskaya st., 10, bd. 1**Lomonosov Moscow State University, 1199991, GSP-1, Leninskiye Gory, 1**Geological Institute RAS, 119017, Moscow, Pyzhevsky lane, 7, bd. 1*

В результате геоморфологических исследований получены новые данные о высокой степени взаимосвязи рельефа и характера новейших движений в пределах впадин Ладожского и Онежского озер. Компьютерное геодинамическое моделирование показало, что эта взаимосвязь объяснима развитием выделенных нами в детальном масштабе предполагаемых активных разломов в обстановке северо-восточного растяжения, ось которого ориентирована вкрест простирания рассматриваемых озерных котловин.

Ключевые слова: Ладожское и Онежское озера, неотектоника, геоморфология.

We obtained new data about the high degree of relationship between the relief and the nature of the latest movements within the depressions of the Ladoga and Onega lakes as a result of geomorphological studies. Computer geodynamic modeling showed that this relationship is explainable by the development of the supposed active faults identified by us on a detailed scale in an environment of northeastern extension, the axis of which is oriented across the strike of the considered lake basins.

Key words: Ladoga and Onega lakes, neotectonics, geomorphology.

Введение. В настоящее время существуют различные мнения о генезисе котловин двух крупнейших пресноводных озер Европы — Ладожского и Онежского. Традиционно в качестве основных факторов рельефообразования обеих впадин рассматривают неотектонические движения и абразионно-аккумулятивную деятельность ледника, однако вопрос оценки значимости этих процессов остается дискуссионным. Большинство исследователей, например [Потехин и др., 2019], отмечают тектоническую природу озерных котловин и полагают, что формирование их морфоскульптуры тесно связано с оледенениями четвертичного периода. В то же время в литературе представлена точка зрения, предполагающая обусловленность рельефа впадин разными причинами (геологическим строением, деятельностью ледника, изостатическими движениями), среди которых неотектонические процессы не выделены как главный фактор рельефообразования. Например, А.В. Амантовым и М.Г. Амантовой [2014] разработана модель развития депрессии Ладожского озера с позиций ледниковой теории. В связи с этим проблема анализа

влияния неотектонических движений на облик рельефа представляется актуальной и интересной. Как показано в ранее опубликованной нами работе [Агibalов и др., 2019], по докембрийским разрывным нарушениям акватории Ладожского озера в новейшем поле напряжений происходят динамические подвижки, обуславливающие ряд особенностей морфологии рельефа. Однако представления разных исследователей о конфигурации древних разломов Ладожского [Амантов, 2014; Анохин и др., 2016; Свириденко, Светов, 2008; Хазов и др., 2004] и Онежского [Бискэ и др., 1971; Лукашов, 1976] озер существенно различаются. Кроме того, помимо унаследованных с дочетвертичного времени, существуют также новообразованные разрывные нарушения.

Таким образом, для решения поставленной исследовательской проблемы, на наш взгляд, требуется разработка схем активных разломов Ладожского и Онежского озер. Этот вопрос представляется недостаточно проработанным, поскольку в литературе описаны в основном крупные активные разрывные нарушения регионального масштабного

¹ Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, ст. науч. с., канд. геол.-минер. н.; *e-mail*: agibalo@yandex.ru

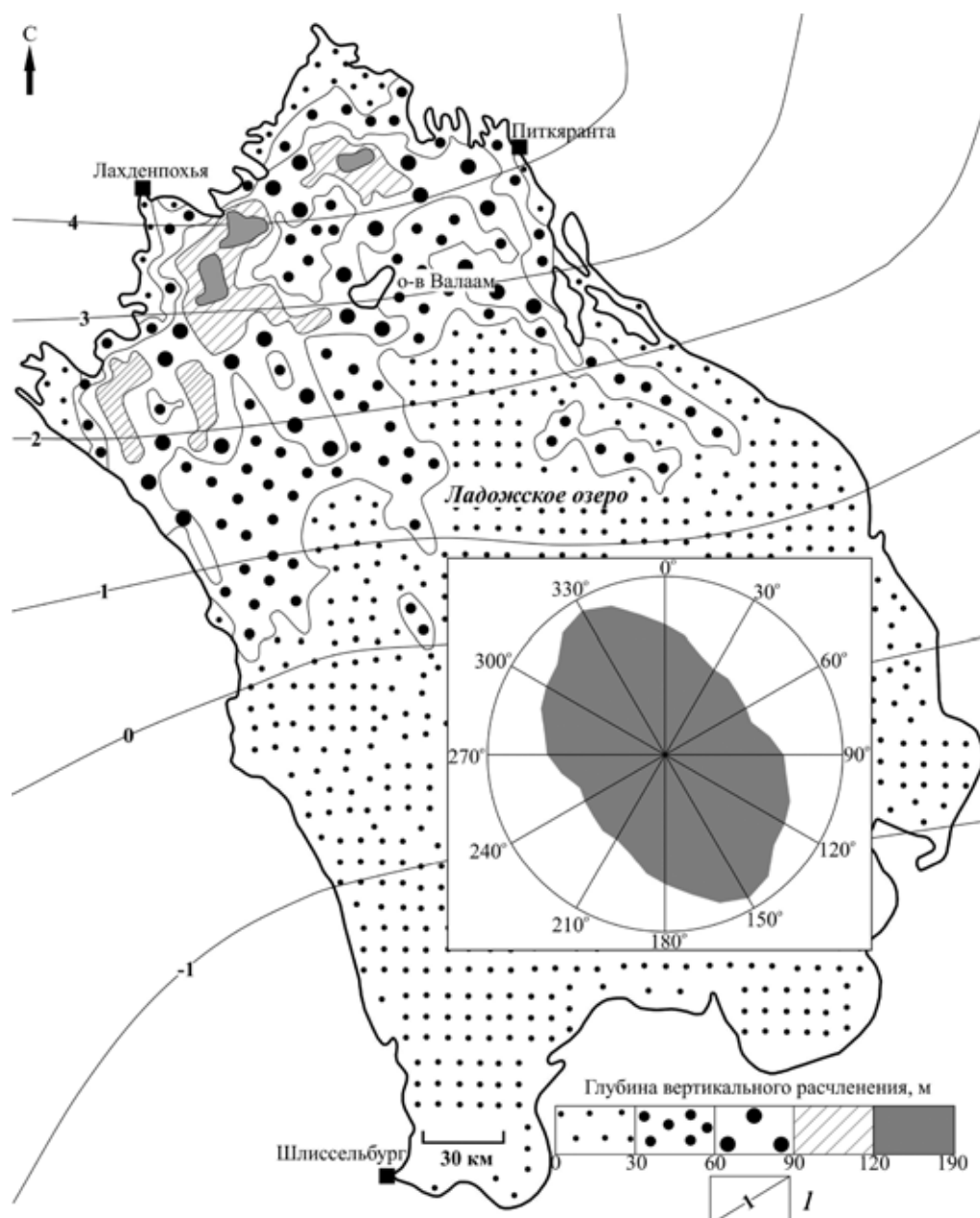
² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, вед. науч. с., канд. геол.-минер. н.; *e-mail*: v.zaitsev@mail.ru

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

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, аспирант; Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, мл. науч. с.; *e-mail*: manuiloaekaterina139@gmail.com

⁵ Геологический институт РАН, отдел тектоники, лаборатория тектоники консолидированной коры, ст. науч. с., канд. геол.-минер. н.; *e-mail*: anton302@mail.ru

Рис. 1. Схема глубины вертикального расчленения рельефа котловины Ладожского озера: *I* — изолинии значений скорости современных вертикальных движений (мм/год), по [Прилепин и др., 2002]. На врезке — роза-диаграмма, иллюстрирующая направления простирания склонов



уровня [Лукашов, 1976; Шварев и др., 2020]. На основе анализа геолого-геоморфологической информации нами построены схемы предполагаемых активных разломов, разработаны компьютерные геодинамические модели, позволяющие оценить их влияние на рельеф, получены новые данные о связи рельефа с характером неотектонических движений.

Материалы и методы исследований. Для анализа взаимосвязи между рельефом и новейшей тектоникой, выделения предполагаемых активных разрывных нарушений нами составлены цифровые модели рельефа (ЦМР) по картам глубин [Атлас..., 2005; Ладожское..., 2002]. Число промеров глубины составляет 14 593 и 12 485 соответственно, среднее расстояние между промерами — 1,1 и 0,9 км для Ладожского и Онежского озер соответственно. По ЦМР построены схемы глубины вертикального расчленения рельефа, определенной как разность

между максимальным и минимальным значениями глубин в пределах расчетных ячеек [Спиридонов, 1975] (рис. 1, 2). Выбор этого параметра обусловлен тем, что в ряде случаев он отражает направленность новейших движений [Симонов, 1999]. С помощью модуля Aspect программы ArcGis составлены розы-диаграммы, иллюстрирующие ориентировку склонов. Средние круговые значения рассчитаны по формулам, приведенным в монографии [Мардиа, 1978]. В программе LESSA А.А. Златопольского [2011] проведен автоматизированный анализ ЦМР, включающий построение схем плотности линеаментов (рис. 3) и линий вытянутости (рис. 4), ориентированных вдоль удлинённых форм рельефа. Особенности распределения перечисленных морфометрических параметров по площади сопоставлены с геологическими данными о характере современной сейсмичности [Earthquake..., 2020] и палеосейсмичности [Шварев и др., 2020], значени-

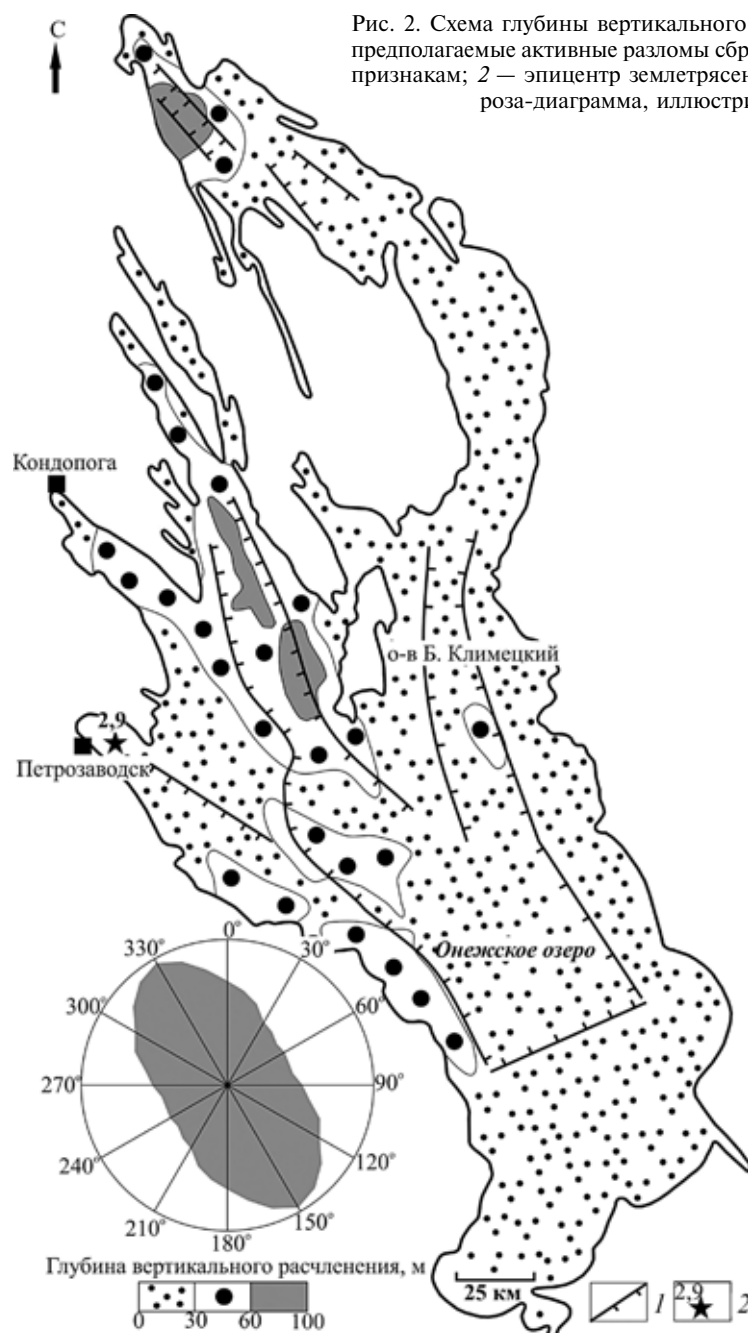


Рис. 2. Схема глубины вертикального расчленения рельефа котловины Онежского озера: 1 — предполагаемые активные разломы сбросовой кинематики, выделенные по геоморфологическим признакам; 2 — эпицентр землетрясения магнитудой 2,9, по [Earthquake..., 2020] На врезке — роза-диаграмма, иллюстрирующая направления простирания склонов

приведенных в [Руководство..., 2020], указан тип внешней нагрузки — растяжение, ось которого ориентирована по азимуту 60° (вкрест простирания озерных котловин). Согласно [Агибалов и др., 2019; Леонов и др., 2003], этот тип напряженного состояния проявляется на новейшем этапе в пределах акваторий Ладожского и Онежского озер. Проверка обоснованности заданных ориентировок главных нормальных осей напряжений путем анализа решений фокальных механизмов очагов землетрясений не представляется возможной в связи с отсутствием необходимых сейсмологических данных. В результате моделирования, физико-математической основой которого послужил закон Кулона—Мора [Руководство..., 2020], рассчитаны значения относительной амплитуды вертикальных перемещений по предполагаемым активным разломам. На количественном уровне выполнено сопоставление этого параметра с глубинами озерных котловин, подтвердившее возможность интерпретации выделенных нами линеаментов как предполагаемых активных разломов.

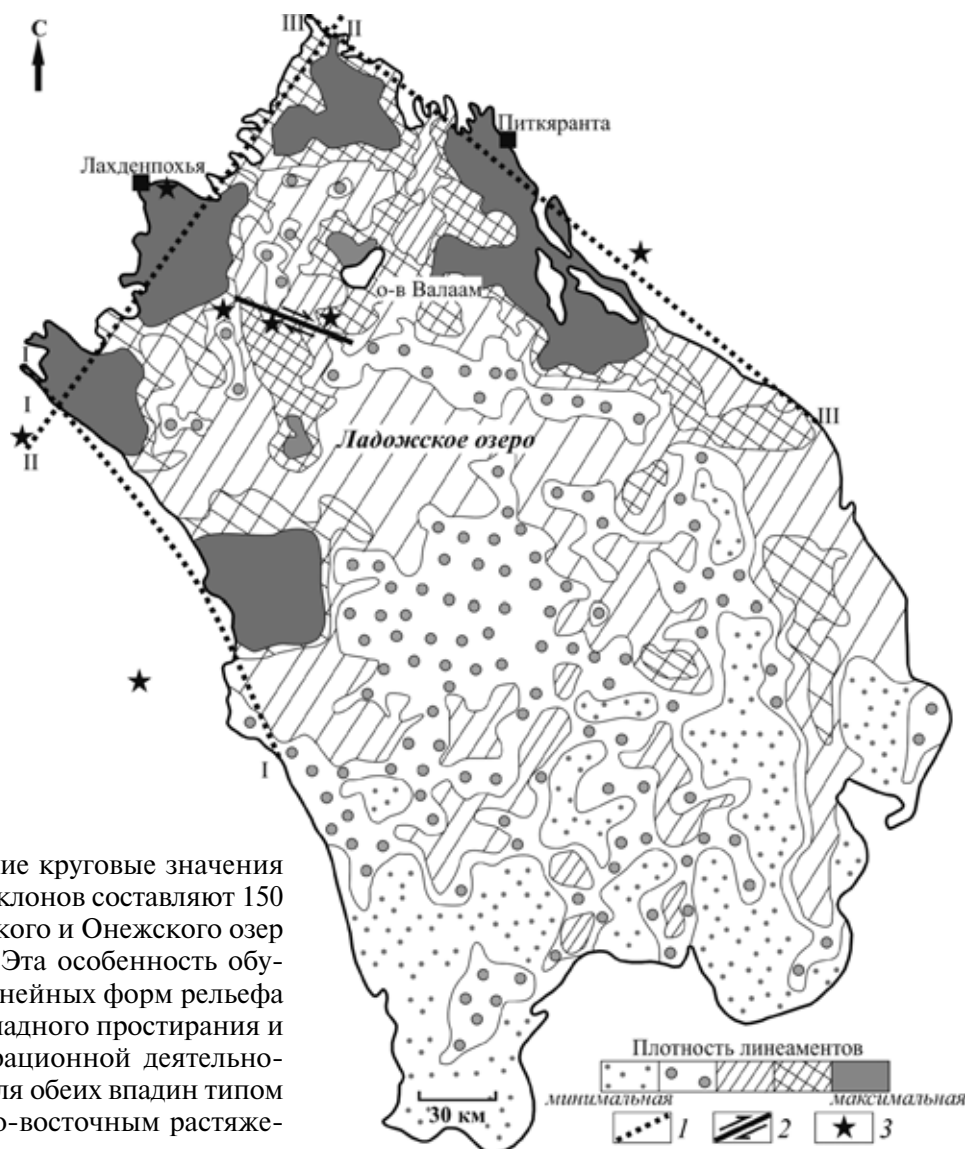
Расчет критерия Колмогорова—Смирнова в программе SPSS Statistics 17,0 по значениям глубины показал, что их распределение отличается от нормального, поэтому для оценки взаимосвязи упоминаемых в статье параметров использован коэффициент ранговой корреляции Спирмена.

Результаты исследований и их обсуждение. По данным анализа рельефа выделены следующие общие для котловин Ладожского и Онежского озер геоморфологические особенности: 1) обе впадины вытянуты в

северо-западном направлении; 2) в рельефе дна наблюдается большое количество сопряженных линейных поднятий и впадин северо-западного простирания; 3) северные части котловин более глубоководные и отличаются более расчлененным рельефом по сравнению с южными; 4) для северных побережий характерны первичные, слабоизмененные и неизмененные озерными процессами морфогенетические типы берегов с ледниково-тектоническим расчленением, не встречающиеся в центральных и южных частях [Анохин и др., 2017; Игнатов и др., 2017]. На наш взгляд, эти особенности обусловлены общими закономерностями протекания неотектонических процессов. Ориентировка котловин в северо-западном направлении связана с активизацией Ладожского и Онежского грабенов.

ях скорости современных вертикальных движений [Прилепин, 2002] и конфигурацией активных разломов [Лукашов, 1976; Шварев и др., 2020]. Кроме того, по геоморфологическим признакам нами выделены предполагаемые активные разломы, в качестве которых рассматривались хорошо выраженные в рельефе линеаменты, разделяющие разновысотные участки. Для подтверждения обоснованности схем предполагаемых активных разломов проведено компьютерное геодинамическое моделирование в программе RMS 2013 компании «Рохат». При моделировании по ЦМР построена поверхность в формате Grid, на которую нанесена сетка предполагаемых активных разрывных нарушений. После этого заданы осредненные значения параметров геологической среды — коэффициентов Пуассона (0,25) и внутреннего трения (0,6),

Рис. 3. Схема плотности линейментов котловины Ладожского озера: 1 — сейсмолинементы, по [Шварев и др., 2020]: I–I — Западно-Ладожский, II–II — Северо-Ладожский, III–III — Восточно-Ладожский; 2 — активный разлом правосдвиговой кинематики; 3 — эпицентры современных землетрясений, по [Earthquake..., 2020]



Установлено, что средние круговые значения направлений простираения склонов составляют 150° и 144° для котловин Ладожского и Онежского озер соответственно (рис. 1, 2). Эта особенность обусловлена преобладанием линейных форм рельефа юго-восточного—северо-западного простираения и объяснима не только экзарационной деятельностью ледника, но и общим для обеих впадин типом внешней нагрузки — северо-восточным растяжением, ортогонально оси которого могут развиваться мелкие грабенообразные структуры [Черемных, Каримова, 2018]. Приуроченность максимальных отметок глубины (233 м для Ладожского и 119 м для Онежского озера) к северным частям впадин, а также высокие значения глубины вертикального расчленения (рис. 1) и плотности линейментов (рис. 3) в пределах северной морфоструктурной зоны котловины Ладожского озера связаны, на наш взгляд, с интенсивностью неотектонических движений.

В пользу обоснованности этого предположения свидетельствуют следующие данные: 1) северные части обеих впадин рассматриваются как области массового развития палеосейсмодислокаций [Шварев и др., 2020], а на южных побережьях описаны только отдельные деформации сейсмогенной природы [Полещук и др., 2020]; 2) все эпицентры современных землетрясений с малой магнитудой [Earthquake..., 2020] расположены в северных морфоструктурных зонах Ладожского и Онежского озер (рис. 1, 2); 3) наблюдается закономерное увеличение скорости современных вертикальных движений в северо-западном направлении от -1

до 4 мм/год [Прилепин и др., 2002]; 4) установлена численная корреляция между значениями глубины вертикального расчленения Ладожского озера и крутизной изолиний скорости вертикальных движений (коэффициент корреляции Спирмена равен 0,59). Отметим, что наибольшие значения плотности линейментов котловины Ладожского озера прослеживаются вдоль показанных в статье [Шварев и др., 2020] сейсмогенерирующих структур — Западно-, Северо- и Восточно-Ладожской. Три эпицентра современных землетрясений с магнитудой 3,2, 2,5 и 2,4 (глубина сейсмического очага около 12 км) [Earthquake..., 2020], расположенные юго-западнее о-ва Валаам, приурочены к выделенному по геофизическим данным докембрийскому разлому северо-западного простираения [Хазов и др., 2004]. Он хорошо выделяется на схеме плотности линейментов, а смещение локальных максимумов этого параметра вдоль разлома указывает на его правосдвиговую кинематику (рис. 3). Пространственный рисунок линий вытянутости подчеркивает преобладание линейных форм рельефа северо-западной ориентировки.

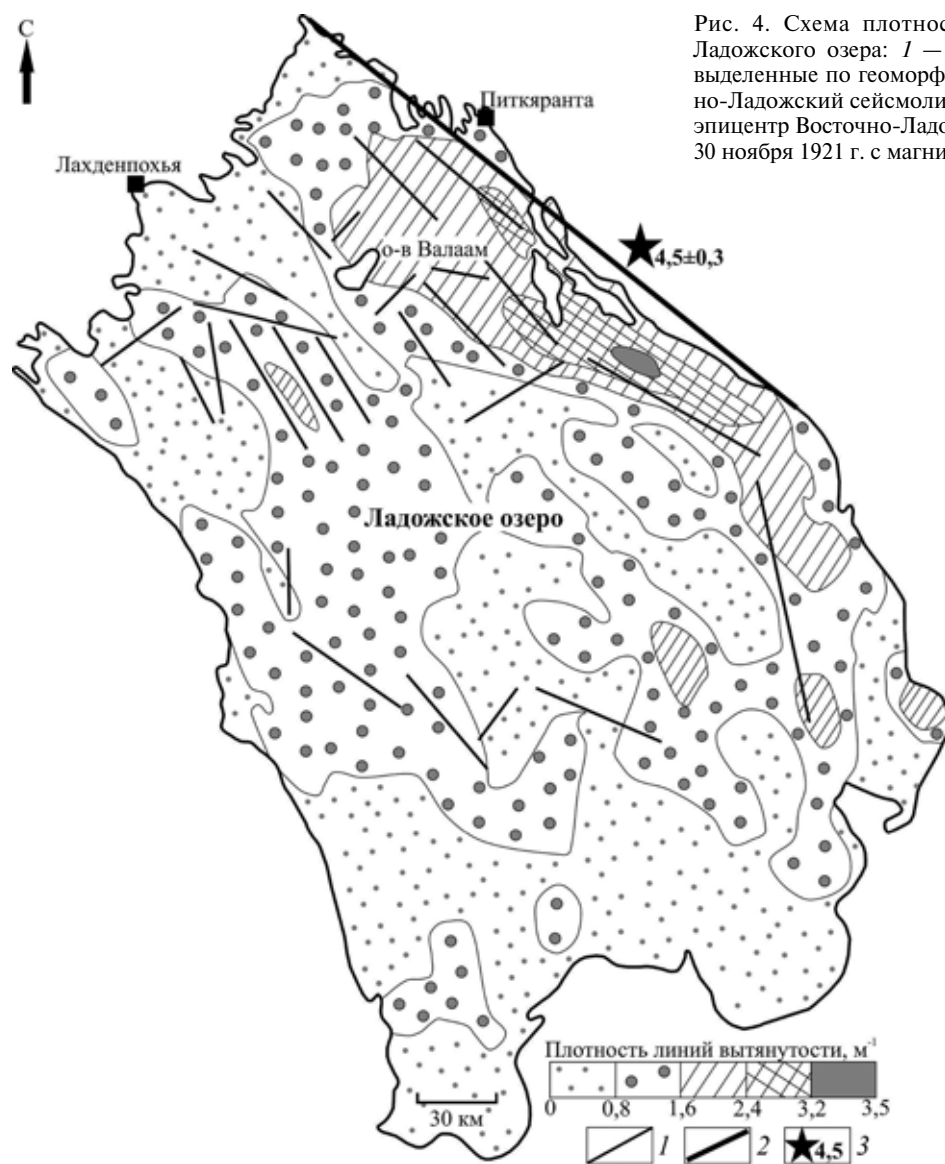


Рис. 4. Схема плотности линий вытянутости котловины Ладожского озера: 1 — предполагаемые активные разломы, выделенные по геоморфологическим признакам; 2 — Восточно-Ладожский сейсмолинемент, по [Шварев и др., 2020]; 3 — эпицентр Восточно-Ладожского (Салминского) землетрясения 30 ноября 1921 г. с магнитудой $4,5 \pm 0,3$, по [Шварев и др., 2020]

Протягивающийся вдоль восточного побережья Ладожского озера максимум плотности линий вытянутости (рис. 4) приурочен к активному на современном этапе сегменту Восточно-Ладожского сейсмолинеамента, с которым связано самое сильное за исторический период наблюдений землетрясение в Приладожье с магнитудой $4,5 \pm 0,3$ [Шварев и др., 2020]. В пределах акватории Онежского озера по повышенным значениям глубины вертикального расчленения рельефа выделяется рассмотренная в монографии [Лукашов, 1976] грабенообразная структура северо-западного простирания, расположенная западнее о-ва Большой Климецкий (рис. 2). В целом проведенные нами геоморфологические исследования показали высокую степень взаимосвязи рельефа и неотектонических движений.

Для того, чтобы объяснить эту взаимосвязь, выполнено компьютерное моделирование новейшей геодинамики. Оно показало, что при использовании составленных нами схем предполагаемых активных разломов (рис. 2, 4) существует

численная корреляция между значениями глубины и относительными амплитудами вертикальных перемещений (коэффициент корреляции Спирмена равен 0,68 и 0,47 для Ладожского и Онежского озер соответственно). Большее значение коэффициента корреляции для Ладожского озера, чем для Онежского, объяснимо более активными проявлениями неотектонических процессов, о чем свидетельствует большее число эпицентров современных землетрясений в Приладожье, а также их магнитуда [Earthquake..., 2020]. В целом установленная корреляция указывает на возможность интерпретации выделенных нами линеаментов как предполагаемых активных разломов и позволяет сделать вывод о значительном влиянии неотектонических движений на облик рельефа впадин Ладожского и Онежского озер.

Закключение. Таким образом, проведенные исследования позволили достичь следующих основных результатов. Во-первых, получены новые данные о высокой степени взаимосвязи рельефа котловин Ладожского и Онежского озер с харак-

тером неотектонических движений. Во-вторых, составлены схемы предполагаемых активных новейших разломов в детальном масштабе. Кроме того, разработаны геодинамические модели, объясняющие связь рельефа и новейшей тектоники обеих озерных впадин активизацией выделенных нами предполагаемых разломов в обстановке северо-восточного растяжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агибалов А.О., Сенцов А.А., Зайцев В.А. Влияние активизированных докембрийских разрывных нарушений на рельеф котловины Ладожского озера // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2019. № 3. С. 99–105.

Амантов А.В. Геология дочетвертичных образований и тектоника Ладожского озера // Региональная геология и металлогения. 2014. № 58. С. 22–32.

Амантов А.В., Амантова М.Г. Развитие котловины Ладожского озера с позиций ледниковой теории // Региональная геология и металлогения. 2014. № 59. С. 5–14.

Анохин В.М., Науменко М.А., Нестеров Н.А. Особенности направленности линейных форм рельефа дна Ладожского озера // География: развитие науки и образования. Ч. I: Монография по мат-лам ежегодной Междунар. науч.-практ. конф. LXIX Герценовские чтения, посвященной 115-летию со дня рождения С.В. Калесника. СПб., 2016. С. 108–117.

Анохин В.М., Уличев В.И., Дудакова Д.С. и др. Геоморфологические особенности берегов Ладожского озера по результатам полевых работ с применением беспилотного летательного аппарата // География: развитие науки и образования. СПб: РГПУ имени А.И. Герцена, 2017. С. 118–124.

Атлас единой глубоководной системы европейской части РФ. Т. 4. Беломорско-Балтийский канал. СПб.: ГБУ «Волго-Балт», 2005.

Бискэ Г.С., Лак Г.Ц., Лукашов А.Д. и др. Строение и история котловины Онежского озера. Петрозаводск: Карелия, 1971. 75 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.

Игнатов Е.И., Борщенко Е.В., Загоскин А.Л. и др. Связь геологического строения побережья, истории развития рельефа и динамики берегов Онежского озера // Тр. КарНЦ РАН. 2017. № 3. С. 65–78.

Ладожское озеро: Атлас. СПб.: ИНОЗ РАН, 2002. 128 с.

Леонов М.Г., Колодяжный С.Ю., Зыков Д.С. и др. Тектоника Онежской мульды. Статья II. Глубинное строение, неотектоника и геодинамика // Изв. вузов. Геология и разведка. 2003. № 2. С. 12–17.

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

Финансирование. Исследование выполнено в рамках Государственного задания ИФЗ имени О.Ю. Шмидта РАН (А.О. Агибалов и А.А. Сенцов, Е.А. Мануилова) при финансовой поддержке в рамках темы Госзадания ГИН РАН № 0135-2019-0047 (А.В. Полешук) и НИР «Новейшая геодинамика и ее влияние на фильтрационные свойства геологической среды» (В.А. Зайцев).

Мардиа К. Статистический анализ угловых наблюдений. М.: Наука, 1978. 240 с.

Полешук А.В., Зыков Д.С., Колодяжный С.Ю. К проблеме типизации сейсмогенных структур юго-восточной окраины Балтийского щита Восточно-Европейской платформы // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 2020. Т. 95, вып. 1. С. 3–13.

Потахин М.С., Белкина Н.А., Субетто Д.А. и др. Особенности генезиса котловин и строения донных отложений озер юго-восточного склона Фенноскандинавского кристаллического щита // Астраханский вестник экологического образования. 2019. № 6 (54). С. 4–13.

Прилепин М.Т., Мишин А.В., Кабан М.К. и др. GPS изучение геодинамики Балтийского щита // Физика Земли. 2002. № 9. С. 49–58.

Руководство пользователя «Analysis Package Reservoir Modelling System (RMS)», 2012. URL: www.geodisaster.ru/index.php?page=uchebnye-posobiya-2 (дата обращения: 21.12.2020).

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

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

Спиридонов А.И. Геоморфологическое картографирование. М.: Недра, 1975. 184 с.

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

Черемных А.С., Каримова А.А. Особенности проявления разноранговых зон растяжения в рельефе экспериментальных моделей и их природных аналогов // Изв. Сиб. отд. Секции наук о Земле РАЕН. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41, № 1. С. 79–98.

Шварев С.В., Никонов А.А., Родкин М.В. Воттоваара — Западно-Онежский линеамент: признаки и параметры сейсмической активности в голоцене // Фундаментальные проблемы геотектоники и геодинамики. Мат-лы ЛП Тектон. совещания. М.: ГЕОС, 2020. Т. 2. С. 415–419.

Earthquake database of the Institute of Seismology of the University of Helsinki. URL: <https://www.seismo.helsinki.fi/EQ-search/query.php> (дата обращения 27.10.2020).

Поступила в редакцию 31.01.2021

Поступила с доработки 05.04.2021

Принята к публикации 03.08.2021