

## РАЗВИТИЕ КОТЛОВИНЫ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА С ПОЗИЦИЙ ЛЕДНИКОВОЙ ТЕОРИИ

В результате геолого-геоморфологического анализа с привлечением специализированных систем компьютерного моделирования обсуждена общая концепция формирования дочетвертичной поверхности и во многом современного рельефа дна Ладожского озера с позиций ледниковой теории. Комплексная ледниковая и водно-ледниковая денудация послужила определяющим фактором развития разнопорядковых структурно-денудационных форм. Предложено выделение самостоятельного семейства равнинных цирков ледниковых щитов. К ним, по мнению авторов, относится гигантский Североладожский, на сегодня самый крупный в мире, а также Ландсорт – самая глубокая впадина Балтийского моря. При этом ледниковый цирк трактуется как котловина в виде амфитеатра с близкими значениями длины и ширины, крутым фронтальным склоном либо уступом, выраженными боковыми склонами и тыловым порогом, обычно расположенная в пределах ледникового потока, создавшего характерный выраженный контрастный профиль рельефа в геолого-геоморфологически предопределенных участках.

Ключевые слова: *ледник, денудация, цирк, корри, Ладожское озеро, рельеф, геоморфология.*

The general concept of the formation of pre-Quaternary surface and, in many ways, the modern landscape of Lake Ladoga is discussed as a result of geological-geomorphological analysis including specialized computer modeling systems, with implications of aspects of the glacial theory. Complex glacial and fluvio-glacial denudation served a determining factor in the development of structural-denudational forms of various order. We propose existence and specification of the independent family of non-mountain cirques created by ice sheets. It includes giant Severoladozhsky (North Lake Ladoga) cirque representing the largest corrie in the world, as well as Landsort – the deepest basin of the Baltic Sea. In this case a glacial cirque is determined as an amphitheatre-shaped overdeepened basin, with close values of length and width, steep headwall, side slopes and pronounced lip; the basin is usually located within the ice stream, which produces a typical specific contrast terrain profile in geologically and geomorphologically predetermined locations.

Keywords: *ice sheet, glacial erosion, cirque, corrie, Lake Ladoga, terrain, geomorphology.*

Возрастающий потенциал компьютерных технологий со слиянием подготовки геолого-геоморфологических карт, анализа и пространственно-временного моделирования открывает новые возможности для решения ряда релевантных задач, включая вопросы как истории развития, так и выявления природы морфоструктур различного порядка [5]. Некоторыми результатами применения технологии на примере Ладожского озера мы планируем поделиться в данной статье, предложив трактовку происхождения всех крупных элементов рельефа дна котловины. Базовыми послужили материалы непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСП), пробоотбора и изучения островов, полученные отделом региональной геоэкологии и морской геологии ВСЕГЕИ в сотрудничестве с Севзапгеологией СЗГДП, Институтом озероведения и другими организациями в ходе геологосъемочных и методических работ в м-бах 1 : 500 000 – 1 : 200 000. Они были обобщены на качественно новом уровне с применением современных компьютерных технологий. При решении аналитических задач использован программный пакет Golden Software, включающий SurfEr®, Digger®, MapViewer™, Voxler®, а также оригинальные программные коды (VB).

Ладожское озеро – приоритетный для Санкт-Петербурга природный объект. Некоторые морфометрические особенности дна бассейна, как, например, северная глубоководная часть с контрастным рельефом, являются типизирующими для котловины и в какой-то мере специфичными для региона.

**Общая характеристика.** Котловина Ладожского озера сформировалась в пределах фрагмента зоны сочленения Балтийского щита и Русской плиты, осложненного крупной рифейской грабен-синклиналью, названной Ладожско-Пашской [2, 3]. Это и определяет специфику строения дна бассейна. Особенности котловины связаны с распространением неметаморфизованных раннерифейского и позднерифейско-ранневендского (?) комплексов, слагающих грабен-синклиналь и доминирующих в пределах Северной Ладоги. Структурные комплексы архейского либо раннепротерозойского возраста кристаллического фундамента типичны для Балтийского щита и представлены в шхерной зоне. Комплексы плитного (ортоплатформенного) чехла, начавшие формироваться в позднем венде, широко развиты в юго-восточной части Ладожского озера.

Выраженность северной, глубоководной, части Ладоги в современном рельефе, его контрастность,

особенности береговых зон сформировали точку зрения о неотектонически активной зоне [6, 9, 11]. По другим представлениям, рельеф коренных пород котловины Ладожского озера и характер распределения четвертичных осадков – обычный результат избирательного денудационного препарирования фрагмента рифейской структуры с ведущей ролью ледниковой экзарации [1, 2, 8].

В пределах Северной Ладogi доминируют рифейские осадочные и эффузивные породы мощностью в сотни метров [2, 3, 16, 17]. Терригенные образования выведены на дочетвертичный срез главным образом в пределах глубоководной части бассейна. Они представлены красноцветными и сероцветными песчаниками, алевролитами и аргиллитами. Отмечается несколько фаз и эпизодов рифейского траппообразования. К несколько более ранней относятся лавы и силлы, известные на побережье в районе Салми. Пример более молодых магматических проявлений – крупный раннерифейский [28] Валаамский расслоенный силл габброидов и сиенитов мощностью до 150–200 м в районе о. Валаам [16]. Рифейские отложения Северной Ладogi характеризуются общим центриклинальным залеганием и несколько большими углами

падения (первые градусы) в краевых частях. Кроме того, характерны широкие и пологие осложняющие складки с падением до 1–2° с доминирующим северо-западным простиранием. Более сложные пликативные дислокации маркируют некоторые зоны нарушений допоздневендского возраста, существенно дооформивших структурный план.

**Анализ рельефа.** При морфометрическом анализе модели, включающей grids рельефа, кровли дочетвертичных образований, допоздневендского пенеппена, дорифейского основания, разрывных нарушений [4], использованы элементы автоматизированной системы, подготовленной и тестированной нами при решении геолого-геоморфологических задач в платформенных областях, в том числе подвергавшихся оледенениям [5]. В частности, проводился полный анализ процентного распределения с построением абстрактных поверхностей (вершинная, 75% высот, средних высот, базисная, естественных классов [26] при несимметричном распределении), их соотношения (размах, степень расчлененности как соотношение евклидова и трехмерного расстояния между точками выборки) и других статистических параметров

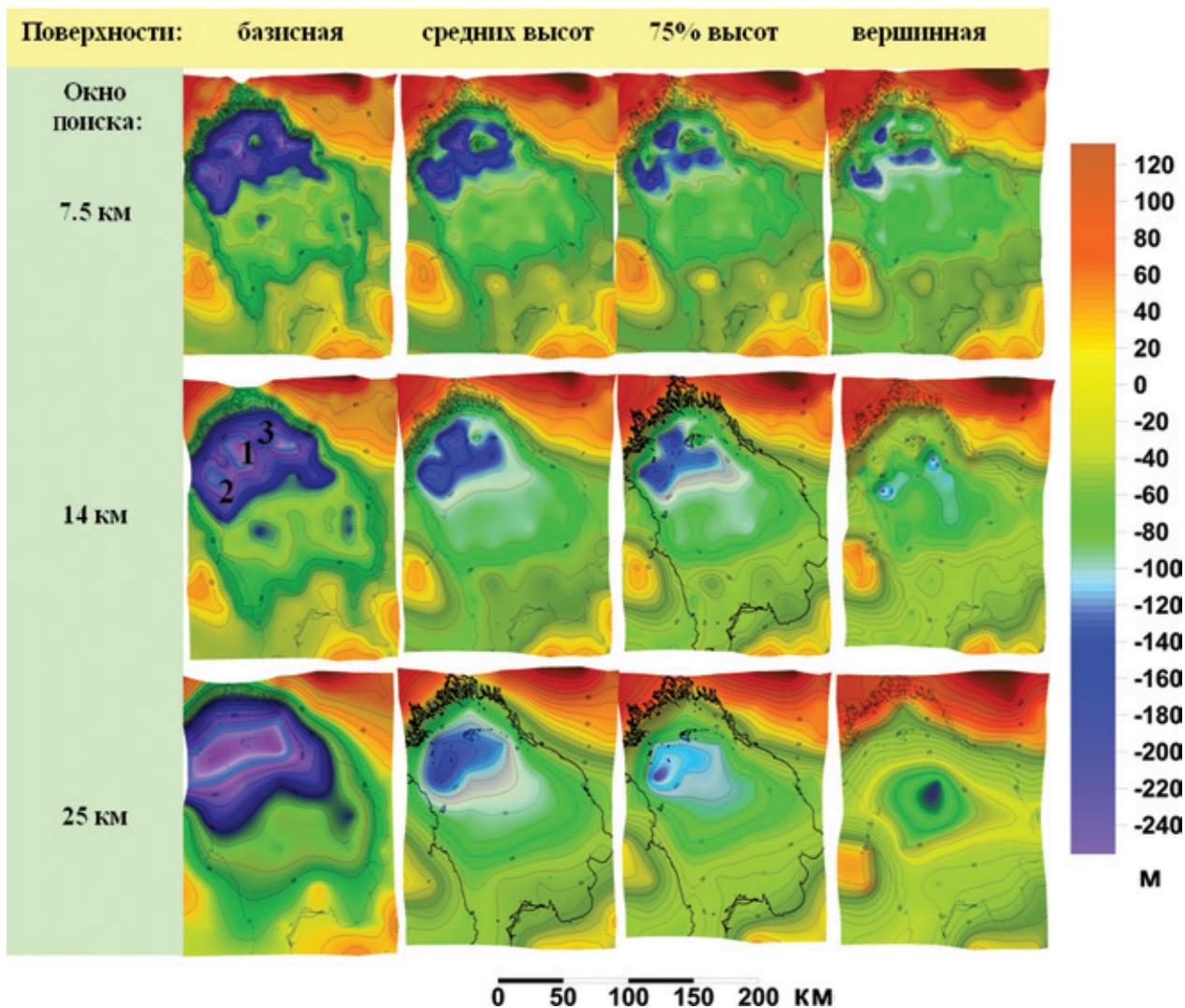


Рис. 1. Выборочные абстрактные поверхности распределения отметок кровли дочетвертичных образований, полученные при морфометрическом анализе с меняющимся окном поиска  
1, 2, 3 – центральная, западная и восточная впадины

в скользящих квадратных окнах поиска различной размерности. Некоторые из них показаны на рис. 1.

Напомним, что размер окна является существенным фактором, особенно если вспомнить одну из указанных черт полициклического рельефа (чем древнее поверхность, тем более высокие участки она занимает, охватывает меньшую площадь и реже встречается) [5]. Для областей, подвергшихся интенсивному воздействию оледенений, важно оценить характер распределения четвертичных образований для исключения влияния специфических аккумулятивных форм, в особенности связанных с конечными моренами. Этому способствует сопряженная обработка рельефа и дочетвертичной поверхности. Кроме того, необходимо учитывать избирательное воздействие ледниковой и водноледниковой денудации даже при меньшем влиянии таковых на относительные возвышенности [15].

Хотя современный анализ поверхностей несомненно является информативным и некоторые его результаты даже могут быть использованы без доработки при геоморфологическом районировании, он лишь дополняет традиционные методы, акцентирующиеся на изучении возраста и генезиса морфоструктур различного ранга. Впрочем, его корректное применение по отработанной методике [5] позволяет делать предварительные выводы о возможном генезисе и истории развития. Например, резкое рассогласование – по мере увеличения окна поиска до допустимых пределов – спокойного рисунка вершинной поверхности (рис. 1) (и смежных естественных классов) с последующими (в ряду к базисной поверхности) позволяет предполагать значительную роль денудационного расчленения с развитием контрастного литоморфного рельефа, а не тектонических движений отдельных блоков. Последующая же автоматизированная корреляция рисунка первых с интерполяцией фактически наблюдаемых (таких как допоздневендский пенеплен) может, например, дать информацию и о возможном возрасте фрагментов поверхностей на командных высотах, степени их сохранности и т. п. Расчет отклонений от медианной поверхности с увеличивающимся окном способствует выделению различных генераций относительных возвышенностей и впадин с их дальнейшей независимой обработкой.

Предлагаем авторское видение формирования крупных элементов рельефа большей частью с позиций модификации поверхности дочетвертичных образований без рассмотрения некоторых деталей голоценовой истории бассейна.

**Северная глубоководная котловина.** Поверхность дочетвертичных образований во впадинах северной глубоководной котловины находится на отметках от –140 до –270 м. Условно ее можно разделить на незначительно более глубокую центральную, восточную и западную (рис. 1). Эти крупные формы приурочены к областям развития рифейских песчаников, алевролитов и аргиллитов, вследствие выдержанных мощностей четвертичных отложений отличающихся сходной выраженностью как в дочетвертичном (коренном), так и в современном рельефе. Однообразен и четвертичный разрез, который характеризуется двумя сейсмокомплексами, отождествляемыми с плащом моренных образований последнего оледенения и поздне-последледниковыми осадками мощностью 20–40 м, большая часть которых, по-видимому, отражает узкий вре-

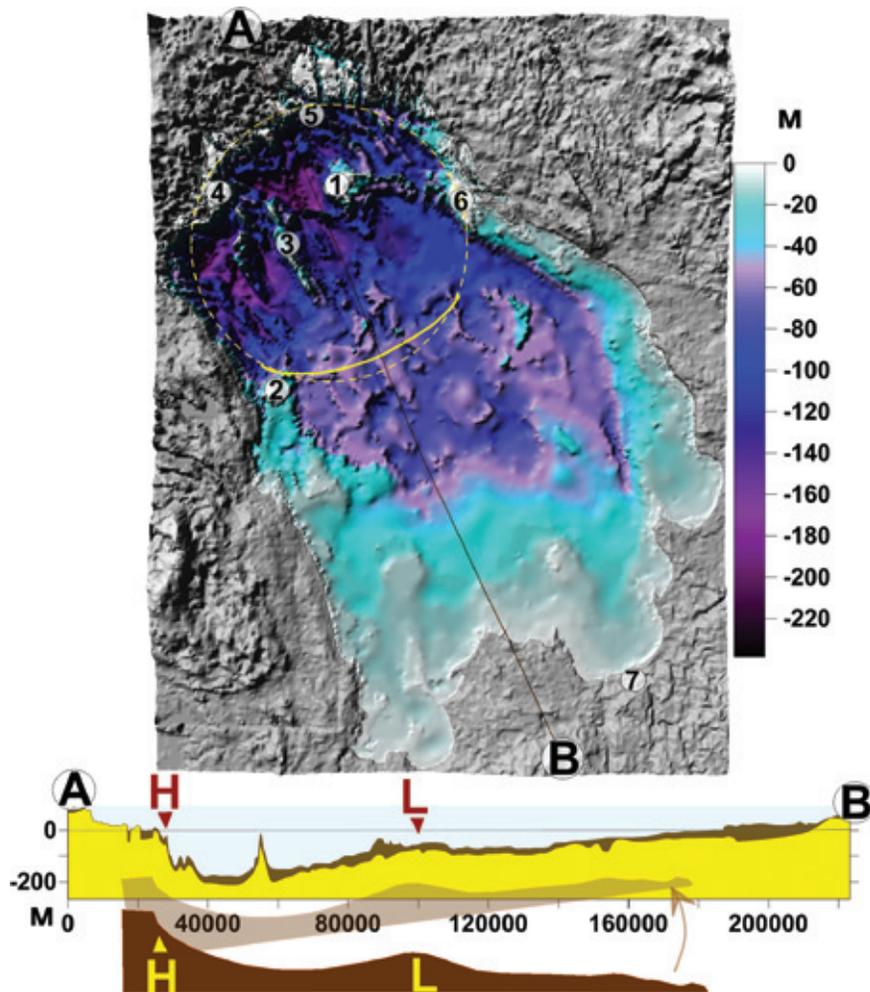
менный интервал непосредственно после дегляциации, которому свойственны ураганные скорости осадконакопления в изолированных понижениях рельефа.

В пределах котловины прослеживаются осложняющие уступы и асимметричные возвышенности, имеющие простираие, во многих случаях согласующееся с простираием рифейских комплексов. Их представитель Валаам (рис. 2) – наиболее крупный остров в пределах глубоководной котловины, разделяющий впадину на центральную и восточную.

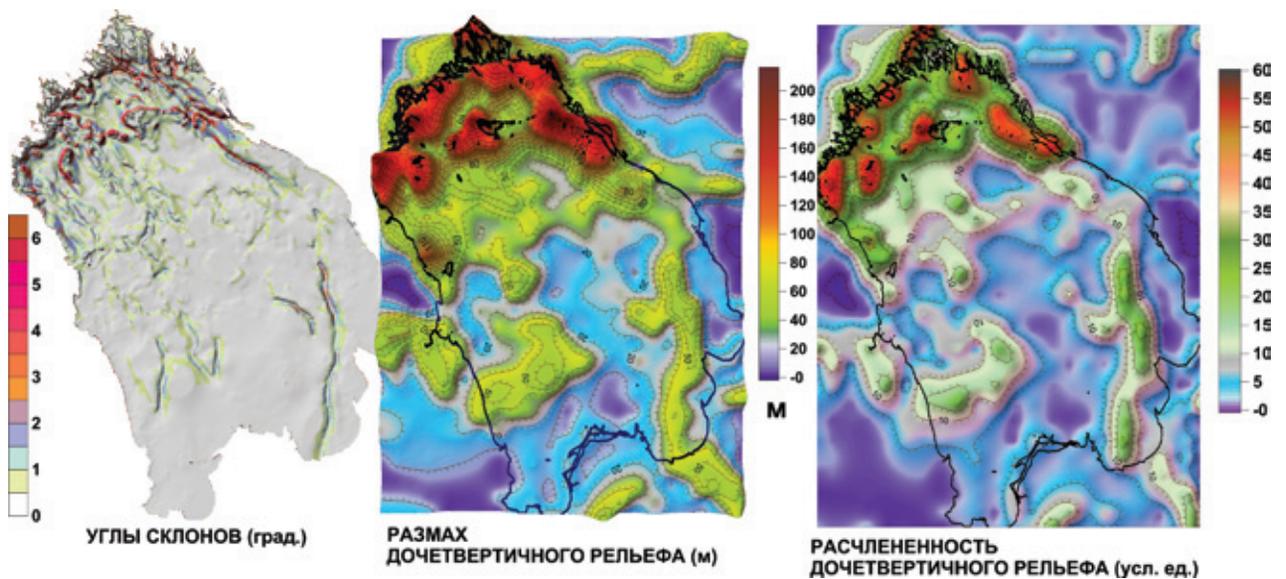
Кроме того, выделяются протяженные линейные северо-западные возвышенности, наиболее четко выражена Воссинансаарская, маркируемая одноименным островом. Именно по ней мы условно разделяем ее на западную и центральную впадины. Также отмечаются небольшие (обычно первые сотни метров в поперечнике) изометричные, но контрастные положительные формы рельефа, распространенные преимущественно севернее Валаама.

Все упомянутые морфоструктуры объединяет происхождение, они бронированы прочными по сравнению с неметаморфизованными осадочными породами субвулканическими образованиями преимущественно основного состава. При высокой расчлененности размах контрастного литоморфного рельефа по поверхности дочетвертичных образований до 210 м в сужении осевой части восточной впадины между островами Валаамской гряды и гряды о. Мантсинсаари при ширине окна поиска 7,5 км (рис. 3). Несколько меньше, но близкие значения достигаются западнее Валаама и вдоль северного и северо-западного побережья. При увеличении окна выборки до 25 км значения размаха рельефа увеличиваются до 310 м, а максимум смещается к вышеупомянутому побережью, приобретая форму характерной подковы, типичной для комплексной ледниковой эрозии при значимом уменьшении угла наклона ложа.

Отмеченное разнообразие контрастных форм, на наш взгляд, обусловлено особенностями проявления субвулканических тел и их геометрией. Серия сближенных уступов и сопряженных возвышенностей вдоль северного побережья, Валаамская и Мантсинсаарская гряды, а также острова Западного архипелага (северо-западнее и западнее о. Воссинансаари) связаны с выходами силлов преимущественно основного состава. Сама же Воссинансаарская возвышенность представляет собой «хвостатую скалу» [3], но частично с коренным ядром, связанным с препарированием комплементарной силлу дайки северо-западного простираия. В пределах архипелага в зонах понижения ледниковой активности отмечаются значительные увеличения мощности четвертичных отложений с вероятным сохранением уцелевших от экзарации останцов домикулинских отложений, отображаемых слоистым сейсмокомплексом, коррелируемым со срезаемыми в береговом уступе юго-западного побережья и образующих крупные положительные формы рельефа. Небольшие же изометричные столбообразные возвышенности, распространенные к северу от Валаама, представляют собой либо препарированные штоки и фрагменты раздувов даек, либо в отдельных случаях останцы силла. Здесь в силу моделируемого изменения характера движения льда также наблюдается некоторое ожидаемое увеличение мощности ледниковых образований.



**Рис. 2. Поверхность современного рельефа.** Цифры в кружках – встречающиеся в тексте названия 1–6 – острова (1 – Валаам, 2 – Коневец, 3 – Воссинаансаари, 4 – Кильписарет, 5 – Воспоминаний, 6 – Мантсинсаари); 7 – побережье Волховской губы. А–В – линия разреза. Желтым пунктиром намечен идеализированный контур Северолоджского цирка, желтым сплошным контуром – фактическое осредненное положение зоны перегиба. На разрезе коричневый цвет – четвертичные, желтый – дочетвертичные отложения. Под разрезом темно-коричневый цвет – профиль классического цирка Blea Water [30] со значительно измененным горизонтальным масштабом. Тенью показан его подворот в направлении стрелки до соответствия разрезу А–В. Н – фронтальный склон, L – зона перегиба (тыловой порог)



**Рис. 3. Некоторые дополнительные характеристики дочетвертичного рельефа**  
 Слева направо: осредненные углы склонов (в град.), размах (в м) при окне выборки 7,5 км, расчлененность (отношение евклидова и трехмерного расстояний, окно 7,5 км)

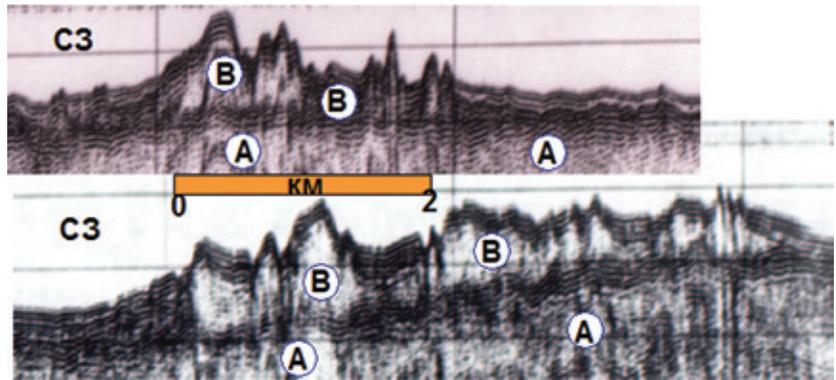
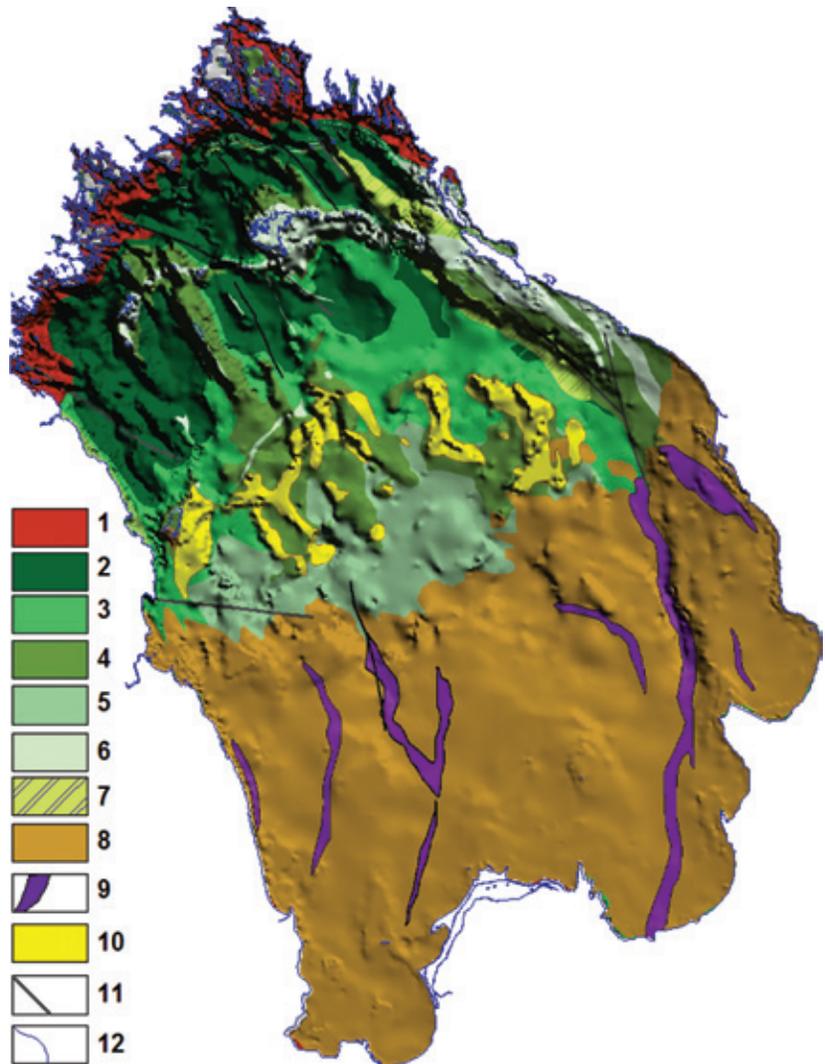


Рис. 4. Отображение на сейсмограммах зон мощной (до 70 м) ледниковой аккумуляции (B), предположительно завершающей стадии оледенения в центральной части бассейна к северо-востоку от о. Коневец. A – сейсмокомплекс, отвечающий рифейским образованиям

Рис. 5. Некоторые типы рельефа Ладожского озера

1 – расчлененная волнистая наклонная ледниковая равнина на дорифейских супракрустальных комплексах; 2–6 – преимущественно плоские и слабоволнистые равнины на рифейских комплексах: 2 – наиболее низменные (ныне аккумулятивные), 3 – низменные (аккумулятивные), 4 – относительно возвышенные (ныне аккумулятивные и частично абразионные), в разной степени связанные с более устойчивыми к денудации образованиями и изменением ледниковой седиментации, 5 – субгоризонтальная плоская равнина (ныне преимущественно аккумулятивная), 6 – наиболее возвышенные (применительно к котловине), часто ограниченные уступами, связанные с наиболее устойчивыми к денудации рифейскими магматическими породами (ныне абразионные и частично аккумулятивные); 7 – относительно возвышенные за счет увеличения мощности четвертичных отложений, частично инверсионные по отношению к дочетвертичной поверхности, приуроченные к ледниковым ложбинам (ныне аккумулятивные и частично абразионные); 8 – плоские и слабонаклонные равнины на поздневендских и кембрийских комплексах (ныне преимущественно аккумулятивные); 9 – некоторые крупные погребенные (туннельные) долины; 10 – холмистый рельеф завершающей ледниковой аккумуляции; 11 – некоторые зоны нарушений, опосредованно участвовавших в изменениях зональности рельефа; 12 – береговая линия



Говоря о линейных осложнениях рельефа, связанных с рифейскими зонами нарушений, отметим доминирующие северо-западные, в особенности у о. Воспоминаний (рис. 2), где зона нарушений опосредованно определила ориентировку оси восточной впадины. Здесь по упомянутой возвышенности мы условно отделяем ее от центральной. Также существенны роль северо-западной и комплементарной северо-западно-субширотной зон, проходящих непосредственно к северу от о. Кильписарет. Здесь они также контролировали выходы рифейских комплексов и, возможно, повышенную трещиноватость, что привело к вариациям рисунка

денудации прежде всего в связи с влиянием на контуры выхода Валаамского силла непосредственно к юго-западу от Валаама. Отметим также близкие к меридиональным (330–350°) зоны нарушений широкого и протяженного дайкового роая. Их выраженность в рельефе дочетвертичных образований локальна и имеет разные знаки. Отрицательные формы выработаны, вероятно, по зонам трещиноватости и сопутствующим пликвативным дислокациям, которые часто являются характеристическими при интерпретации сейсмоакустической записи в случае незначительной мощности даек. Положительные же формы (в виде небольших воз-

вышенностей) создавались в случае раздувов даек или локального изменения геометрии магматических тел. В частности, одна из наиболее крупных Валаамско-Староладожская зона, с которой предположительно связан основной подводящий канал магмы Валаамского силла, интенсивно проявлена в пределах шхерной зоны севернее о. Воспоминаний, где определяет конфигурацию нескольких протяженных фьордов. Говоря о системе нарушений азимута в шхерной части 350°, отметим, что в ряде случаев — это доминирующее направление трещиноватости, сочетающееся с системой трещин азимута 45–50, 110–120, 260–280°.

К юго-востоку северная глубоководная котловина замыкается крайне выположенной Коневецкой зоной перегиба (крайне пологого вала) коренного рельефа, прослеживающейся при детальном анализе к северо-востоку от о. Коневец и переходящей в субгоризонтальную выположенную равнину центральной части бассейна. На склоне котловины и в данной зоне развиты мощные (локально до 70 м) ледниковые отложения, формирующие отчетливые характерные возвышенности сложной формы (рис. 4, 5).

Геоморфологическое районирование по иным принципам приведено Д. А. Субетто [10].

**Северная глубоководная котловина как Северо-ладожский цирк.** Для объяснения происхождения как Коневецкой зоны, так и котловины в целом напомним некоторые типичные и во многом обязательные особенности классических ледниковых цирков (корри), к которым, на наш взгляд, по генетическим и морфологическим (с коэффициентом подобия) признакам она относится. Далее мы именуем ее как *Североладожский цирк*, который, в случае признания данной трактовки, представляет собой самый крупный цирк в мире.

Это котловина в виде амфитеатра, приуроченная к ледниковой долине и имеющая выраженный асимметричный либо радиальный креслообразный профиль, зачастую значительно переуглубленный [27]. Отличается также наличием крутого, часто отвесного фронтального склона (ФС) (headwall в англоязычной терминологии), крутых боковых склонов и невысокого замыкающего краевого порога зон перегиба (ЗП) (lip), который иногда некорректно называют ригелем, поскольку этот термин в отношении цирков скорее применим к осложняющим возвышенностям отчетливо литоморфного рельефа. Для ЗП характерна усиленная ледниковая аккумуляция, часто присутствуют выраженные краевые морены. Многие закономерности морфометрии цирков и их продольного профиля могут быть выражены количественно. Важнейшим, на наш взгляд, является отношение длины, определяющейся между крайней точкой ФС до оси ЗП, к ширине, оценивающейся как максимальное расстояние между боковыми склонами. Оно близко к 1 (0,8–1,2 для 80% морфоструктур) у классических форм с нормальным распределением представительных выборок [23, 29] при некоторых спецификах размерных классов и регионального распространения [19–21]. Иначе говоря, идеальный полностью развитый цирк стремится к окружности (рис. 2), хотя у цирков, выработанных в осадочных породах, как и котловина Северной Ладоги, ширина часто несколько превышает длину [20].

По мере увеличения размеров классических горных цирков размах высот растет меньше, чем длина [21], да и в целом испытывает значительные вариации. Размеры цирков обычно не превышают первых километров, хотя самым крупным считался Валкотт в Антарктиде [24], который представляет собой переработанную ледниковой эрозией метеоритную кальдеру диаметром около 60 км [25]. Ширина же Североладожского цирка около 80 км при осредненном соотношении длины к ширине 0,875 (0,95 без фильтрации Мантсинсаарской ложбины, о которой мы поговорим ниже).

Совершенно естественно, что несмотря на подобие (рис. 2), для каждого масштабного уровня характерна специфика свойств. К ней мы относим существенно меньшее соотношение длины к превышению рельефа, объясняющееся ограниченной возможностью ледниковой и водно-ледниковой денудации, а также потенциально более значимые внутренние вариации. Цирки огромных размеров могут возникнуть только при благоприятном сочетании ряда факторов. По меньшей мере необходимы продолжительное развитие оледенения и обязательная структурная предрасположенность, заключающаяся в наличии задающих ФС дугообразных либо кольцевых элементов ограничения геологических тел. В этих элементах ориентировка оси должна согласовываться с направлением движения льда, обладающего пространственно-временной способностью к их активной денудации. В нашем случае речь идет о наличии потенциально стабильного радиального Ботническо-Ладожского ледникового потока, зона действия которого распространилась на значительную часть рифейской Ладожско-Пашской грабен-синклинали, что привело к избирательной денудации с формированием цирка.

Несмотря на возможный в ближайшем будущем пересмотр степени применимости соотношений Глена, описывающих напряжения вязкопластических деформаций, сегодняшняя степень изученности физических процессов ледников хорошо освещена в литературе [18]. На наш взгляд, стремление цирков к кольцевой форме вызвано направленным изменением скорости вязкопластичного ледникового потока как в горизонтальном сечении, где прогнозируется нормальное известное постепенное увеличение от краев к центру, так и в вертикальном с убыванием скорости к основанию. Сочетание с различным градиентом наклона ложа и теоретическим изменением температурного поля основания, начиная с участка ФС, а также перераспределением водной составляющей вариации скоростей привело к изменению эрозионного рисунка. Форма же ФС задавала конвергенцию потока к зоне ЗП. В какие-то моменты, в зависимости от зрелости формы, углов наклона ФС и общего градиента, можно говорить о ротационном движении [30], хотя это, видимо, относится не ко всем стадиям [15]. Очень упрощенно, во время выраженных пульсационных циклов ледника, при достаточной мощности и благоприятных геолого-геоморфологических условиях, напрашиваются определенные аналогии с оползневыми процессами, которые создают цирки, подобные ледниковым [7].

Осложнения общего классического распределения скоростей обязаны особенностям строения субстрата, таким как выходы на дочетвертичный срез значительно более устойчивых к денудации магматических комплексов. Они привели к разби-

ению базальной части потока на северо-западные сегменты различной динамики с ослаблением скорости и (или) нарушением вектора ротационного движения в пределах островных возвышенностей, в первую очередь таких как Валаам и Мانتсинсаари. В результате наметилась описанная ранее дифференциация с обособлением крупных форм, а ЗП несколько отклонилась от классической в сторону уменьшения длины цирка в теневой по отношению к доминантному северо-западному движению ледника части возвышенностей. Отклонения в юго-восточную сторону к западу от Коневца и особенно южнее Мانتсинсаари связано с ожидаемыми путями эпизодической разгрузки напорных подледниковых вод, на чем мы остановимся подробнее при описании погребенных туннельных долин центральной и южной частей Ладоги.

В качестве доминирующих механизмов денудационного воздействия отметим выпаживание расщеплением крупных фрагментов (плакинг), ледниковую абразию (корразию) и действие базальных водных потоков, включающее абразию, подледную термоабразию, размыв. Под термоабразией в данном случае мы понимаем разрушение основания совместным воздействием циклов замерзания-протаивания и пульсирующих релаксационных колебаний ледника, учитываемых в компьютерной симуляции на определенных стадиях [14, 15] в качестве самостоятельного процесса, в том числе ускоряющего действие плакинга на отдельных участках. Принципиальным для переуглубления котловины является обогачивание в зоне перегиба профиля ФС свежим прочным абразивом, «поставляемым» в тело ледника супракрустальными породами обрамления [15]. Здесь в зоне ФС по аналогии с цирками [30] господствовали процессы плакинга, в том числе образовавшие в шхерной зоне характерные формы рельефа низкого порядка, зависящие не только от состава метаморфических комплексов, но даже в большей степени и от характера трещиноватости. Теоретически они же доминировали в некоторых маркирующих возвышенности зонах перегиба продольного профиля, хотя во всех случаях корректнее говорить о комплексной денудации. Представляется, что последняя была более существенной в связи с более ранними оледенениями [15]. Более того, намечается изменение генерального направления движений ледников в течение плейстоцена, более ранним было невыраженное северо-западное – север-северо-западное и северное. В частности, с этим связано то, что в районе северо-западного побережья классическая форма цирка скрыта в поверхности современного рельефа останцами более древних плейстоценовых отложений.

Теоретическая модель развития во времени со значительной ролью регрессивной (пятящейся) эрозии ФС в сочетании с общим углублением профиля [22] не может быть перенесена на Северолодский цирк, где он изначально контролировался северным бортом рифейской грабен-синклинали. Однако можно говорить о некотором постепенном отступании зоны перегиба склона, не изменившем принципиальную картину развития, для которой необходимо присутствие некоторого начального уступа. Его формирование в зоне контакта породных комплексов с резко различной эрозионной стойкостью, впрочем, вполне естественно. Сторонникам большого вклада кайнозойской доледниковой денудации желателено объяснить небольшую

величину продвижения ФС в сторону щита, не согласующуюся со средними и даже малыми скоростями отступления уступов. Разработанные нами системы [5, 14, 15] позволяют предложить модели трансформации рельефа во временных срезах, но этот вопрос не входит в задачи данной статьи. Впрочем, не будет значительным преувеличением тезис о том, что в существовавших условиях абстрактные вершинные поверхности отображают некоторые возможные черты рельефа дочетвертичных образований, а при условии будущего развития ледниковых щитов без существенных изменений регионального тектонического сценария базисные намечают его последующие изменения (рис. 1).

Предвидя возражения о том, что ледниковые цирки генетически связаны именно с горно-долинными оледенениями и развиваются без выраженной преопределенности, попробуем обсудить этот вопрос. Действительно, классические цирки характерны именно для многих горных ландшафтов. Их происхождение чаще адресуют к ледниковой эрозии в горных трогах, однако вопрос далек от завершения дискуссии [31]. Отечественные ученые всегда справедливо разделяли ледниковые и оползневые цирки [7]. Вопрос, однако, состоит в том, могут ли первые развиваться самостоятельно. Нам представляется, что с позиций моделирования инициация развития цирка в высокогорьях затруднительна по крайней мере без первичного уступа и существенной мощности ледника. Высока вероятность того, что во многих случаях ледниковые и нивальные процессы послужили триггером оползней по уже заложенным зонам с последующей проработкой и модификацией комплексной ледниковой денудацией. В связи со сказанным и существованием многообразия определений ледниковых цирков в мировой литературе предлагаем более универсальное, отвечающее нашему пониманию, **ледниковый цирк** – котловина в виде амфитеатра

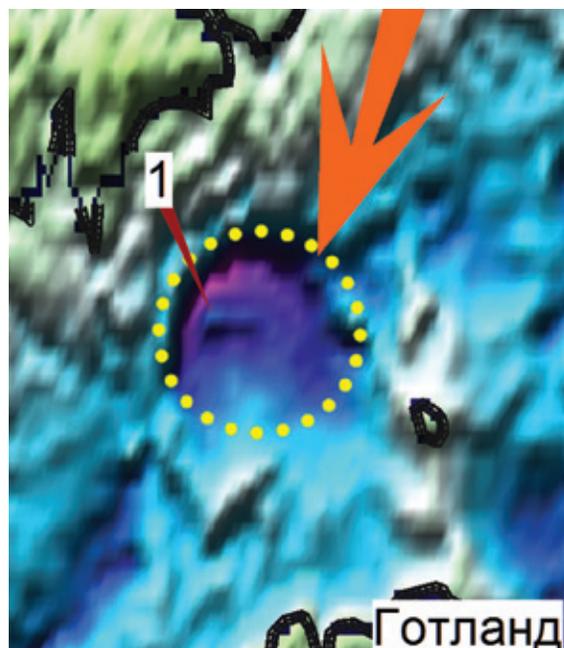


Рис. 6. Ледниковый цирк Ландсорт показан желтым пунктирным абрисом и оранжевой стрелкой  
1 – классическое подковообразное переуглубление ФС – самая глубокая впадина Балтийского моря

с близкими значениями длины и ширины, крутым фронтальным склоном либо уступом, выраженными боковыми склонами и тыловым порогом, обычно расположенная в пределах ледникового потока, создавшего характерный выраженный контрастный профиль рельефа на геолого-геоморфологически предопределенных участках.

Этому определению отвечают как небольшие классические горные цирки, так и гигантский Северолодожский. Впрочем естественно, что он должен относиться к самостоятельному семейству равнинных цирков ледниковых щитов. Его ближайшим родственником авторы считают самую глубоководную впадину Балтийского моря Ландсортскую (Landsort) [13] (рис. 6), где при выплывании рифейской структуры существовали условия, тождественные северной части Ладоги. Несмотря на общее сходство природы котловин окраин Балтийского и Канадского щитов [1], прямые аналоги в этой части Северной Америки отсутствуют, хотя существуют подобные менее выраженные формы, как, например, впадина Южная Чиппева (South Chippewa) озера Мичиган.

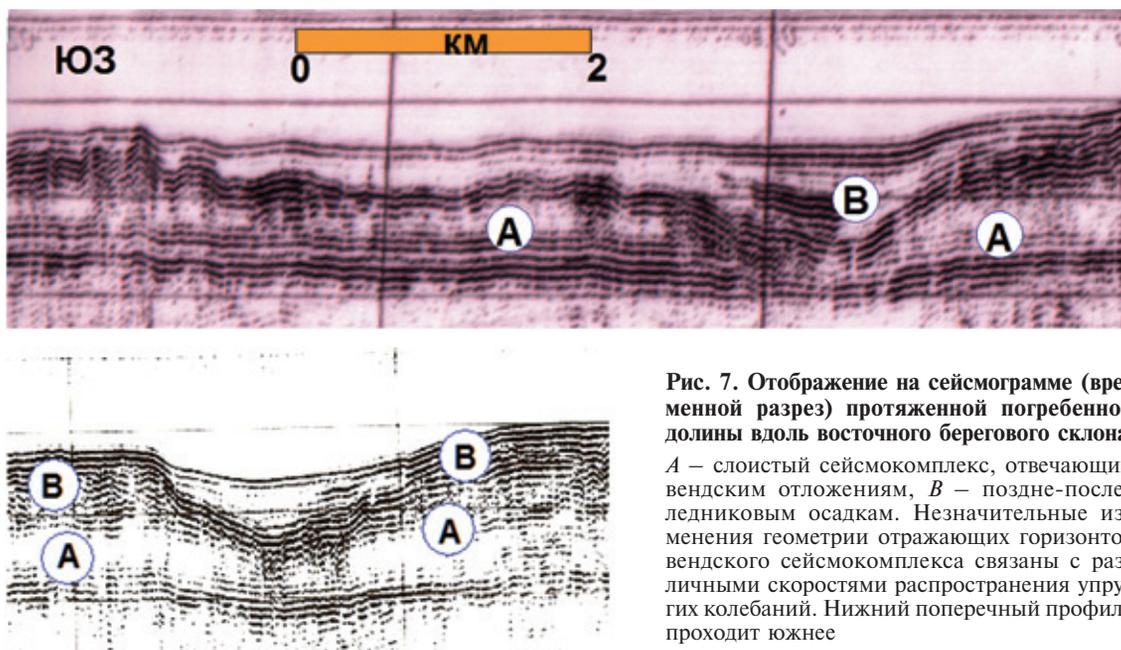
**Субгоризонтальные и пологонаклонные равнины Центральной и Южной Ладоги.** Естественно, что активное действие ледников не заканчивалось в зоне конвергенции, соответствующей ЗП Северолодожского цирка, устойчиво продолжаясь к юго-западу со снижающейся дифференциацией. Субгоризонтальная плоская равнина центральной части бассейна (рис. 5) на рифейских образованиях не демонстрирует заметных вариаций в денудации даже при выведении на эрозионный срез более молодых комплексов Вуоксинской синклинали, существенно отличающихся по физическим свойствам, судя по характеру волновой картины сейсмоакустических профилей. Юго-западнее она граничит с чередующимися субгоризонтальными и пологонаклонными равнинами, сформировавшимися на поздневендских отложениях. Рельеф здесь отчетливо литоморфный, глинистым комплексам свойственны несколько большие углы наклона. Его общий характер не отличается от обычно прояв-

ленного на сложенном плитным чехлом склоне генеральной Беломорско-Балтийской отрицательной формы [2, 12].

Основное осложнение равнин — погребенные долины (врезы), которые являются типичной чертой области распространения чехла (рис. 5). Врезы, показанные в юго-западной части дна бассейна, продолжают далее к югу и образуют общую систему с известными в предглинтовой низменности, определяющими положение р. Нева. Эти контрастные линейные черты дочетвертичной и в меньшей степени современной поверхности вырабатывались эпизодической разгрузкой под гидростатическим давлением подледниковых вод периферической части данной зоны ледникового покрова в целом, и прежде всего Северолодожского цирка, по мере их накопления во впадинах. Участие принимали и надледниковые воды, поступающие по системе трещин, особенно в зонах ФС и ЗП.

Предполагаемый сценарий формирования следующего. В зоне выхода верхневендских отложений возникал некоторый нарастающий встречный градиент, затруднявший движение льда в базальном слое. При этом на некоторых стадиях могло начинаться кратковременное примерзание ледника к ложу с увеличением давления вод и его последующим «подъемом» с прорывом. Циклы могли многократно повторяться. Погребенные долины вырабатывались в легкоденудлируемых породах чехла, возможно, закладываясь по элементам доледниковой речной сети, хотя и на других гипсометрических уровнях. Многие, но не все однажды созданные каналы использовались последующими оледенениями. Как обычно, наиболее выраженные долины формировались по краям ледникового потока, смежным к обрамляющим возвышенностям коренного рельефа с длительно существовавшим ледником с более холодным малоподвижным базальным слоем.

Наиболее выражена протяженная Волховско-Мантсинсаарская долина, врезанная вдоль восточного берегового склона. Ее тальвег контролировался более устойчивыми комплексами позднего венда либо севернее допоздневендского основания. Кон-



**Рис. 7. Отображение на сейсмограмме (временной разрез) протяженной погребенной долины вдоль восточного берегового склона**

*A* — слоистый сейсмокомплекс, отвечающий вендским отложениям, *B* — поздне-последледниковым осадкам. Незначительные изменения геометрии отражающих горизонтов вендского сейсмокомплекса связаны с различными скоростями распространения упругих колебаний. Нижний поперечный профиль проходит южнее

тролирующих долину разрывных нарушений с видимым смещением вендских слоев не установлено (рис. 7), что в целом типично. Контроль положения отдельных фрагментов зонами повышенной микросейсмической трещиноватости не исключается.

Представляется, что активизация врезания долин была связана с положением края ледникового щита и изменением зональности вечной мерзлоты, для оценки которой нами использовался соответствующий авторский программный модуль (Геоледник 2007–Мерзлота 2010). После оценки во времени и пространстве мощности ледникового щита и его динамики при существенной роли автоматизированного анализа разнопорядковых форм рельефа подготавливалась схема распределения базальных температур. Затем с учетом теплового потока, различий теплопроводности геологических комплексов и характера залегания пластов (для коррекции возможной тепловой анизотропии) решалась известная задача Стефана. Возможно, что на определенных стадиях перед зоной глинты, выведенной из водообмена процессами сплошной глубокой мерзлоты, при отепляющем действии более динамичного Ботнического-Ладожского потока в краевой зоне ледника развивалась предглинтовая зона прерывистой мерзлоты с усиленной линейно-очаговой миграцией подледниковых и подземных артезианских вод. Создавались наилучшие условия создания гидростатического давления при пульсирующих выбросах ледниковых вод в систему с энергичной эрозией наиболее податливых отложений. Побочную роль играла смена в разрезе глинистых и песчаных толщ (водоносных комплексов и водоупоров в обычном состоянии) с несколько разной температурой и скоростью промерзания.

В результате комплексного геолого-геоморфологического анализа с привлечением специализированных систем компьютерного моделирования обсуждена общая концепция формирования дочетвертичной поверхности и во многом современного рельефа дна Ладожского озера с позиций современной ледниковой теории. Комплексная ледниковая и водно-ледниковая денудация послужила определяющим фактором развития разнопорядковых структурно-денудационных форм. Предложена более широкая трактовка ледниковых цирков с выделением самостоятельного семейства равнинных цирков ледниковых щитов. К ним, по мнению авторов, относится гигантский Североладожский – на сегодня самый крупный в мире.

Авторы выражают искреннюю благодарность [Г. А. Суслову], М. А. Спиридонову и другим сотрудникам отдела морской геологии и геоэкологии ВСЕГЕИ, а также В. Фьелдскаару и Л. Кэслу за плодотворное обсуждение ряда вопросов, так или иначе связанных с данной статьей.

1. *Амантов А.В.* Сравнительный анализ геологического строения и истории формирования крупных озер окраин Балтийского и Канадского щитов // Актуальные проблемы современной лимнологии: Тез. докл. I Всесоюз. конф. молодых ученых по проблемам лимнологии, апрель 1988 г. – Л.: АН СССР, 1988. – С. 4.

2. *Амантов А.В.* Геологическое строение осадочного чехла бассейнов Северо-Запада России // Осадочный

покров гляциального шельфа северо-западных морей России: Сб. науч. трудов. – СПб.: ВСЕГЕИ, 1992. – С. 25–47.

3. *Амантов А.В.* Этапы геологического развития Ладожского озера // Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера. – СПб.: Русское географ. общ-во, 1993. – С. 5–13.

4. *Амантов А.В.* Трех-четырёхмерное моделирование геологического пространства и подготовка тематических карт геологического содержания с использованием ГИС-программ Golden Software (Surfer®, Didger®, MapViewer™) // Регион. геология и металлогения. 2002. № 15. – С. 34–40.

5. *Амантов А.В.* Системы автоматизированного исследовательского процесса и интеллектуального многомерного анализа применительно к решению геолого-геоморфологических задач // Регион. геология и металлогения. 2007. № 30–31. – С. 85–92.

6. *Биске Г.С., Лукашов А.Д., Экман И.М.* О связи котловин крупнейших озер Северо-Запада СССР с тектоникой // Новейшие и современные движения земной коры восточной части Балтийского щита. – Петрозаводск, 1974. – С. 35–42.

7. Геологический словарь. В 2 т. / под ред. К.Н. Паффенгольца и др. – М.: Недра, 1973. Т. 1. – 486 с.; Т. 2. – 456 с.

8. История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки / под ред. Д.Д. Квасова, Г.Г. Мартинсона, А.В. Раукаса. – Л., 1990. – 280 с.

9. Ладожское озеро / под ред. Г.С. Бискэ. – Петрозаводск, 1978. – 205 с.

10. Ладожское озеро: Атлас / под ред. В.А. Румянцев. – СПб., 2002. – 128 с.

11. *Усикова Т.В., Малаховский Д.Б., Гарбар Д.И.* Домиклидинские озерные отложения Северо-Западного Приладожья // История озер: Труды Всесоюзного симп. Т. 2. – Вильнюс, 1970. – С. 123–133.

12. *Amantov A.* 1995. Plio-Pleistocene Erosion of Fennoscandia and its Implication for the Baltic Area // Prace Panstw. Inst. Geol. CXLIX. Warszawa. 47–56.

13. *Amantov A., Amantova M.* 2012. Giant glacial cirques of non-mountainous terrains // EGU General Assembly Geophys. Res. Abstracts, Vol. 14, EGU2012-1751-1. (<http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2012/EGU2012-1751-1.pdf>; <http://adsabs.harvard.edu/abs/2012EGUGA..14.1751A>).

14. *Amantov A., Fjeldskaar W.* 2013. Geological-Geomorphological features of the Baltic Region and Adjacent Areas: imprint on glacial-postglacial development // Regional Geology and Metallogeny. 53. 90–104.

15. *Amantov A., Fjeldskaar W., Cathles L.* 2011. Glacial Erosion/Sedimentation of the Baltic Region, and the Effect on the Postglacial Uplift. The Baltic Sea Basin. Chapter 3. 53–71.

16. *Amantov A., Laitakari I., Poroshin Ye.* 1996. Jotnian and Postjotnian: sandstones and diabases in the surroundings of the Gulf of Finland // Geol. Survey of Finland, Spec. Pap. 21, 99–113.

17. *Amantov A., Sederberg P., Hagenfeldt S.* 1995. The Mesoproterozoic to Lower Palaeozoic sedimentary bedrock sequence in the Northern Baltic Proper, Aland Sea, Gulf of Finland and Lake Ladoga // Prace Panstw. Inst. Geol. CXLIX, Warszawa, 19–25.

18. *Cuffey K.M., Paterson W.S.B.* 2010. The Physics of Glaciers, 4th edition. Amsterdam: Elsevier. 693 p.

19. *Evans I.S., Cox N.* 1974. Geomorphometry and the operational definition of cirques. Area, Institute of British Geographers. Vol. 6. – P. 150–153.

20. *Evans I.S.* 2006. Allometric development of glacial cirque form: geological, relief and regional effects on the cirques of Wales // Geomorphology. 80 (3–4). – P. 245–266.

21. *Evans I.S.* 2009. Allometric development of glacial cirques: an application of specific geomorphometry // R. Purves, S. Gruber, R. Straumann, T. Hengl / eds, Proceed. Geomorphom. 2009. Univ. of Zurich. – P. 248–253.

22. *Gordon J.E.* 1977. Morphology of cirques in the Kintail-Affric-Cannich area of Northwest Scotland // Geografiska Annaler. 59A: – P. 177–194.

23. *Graf W. L.* Cirques as Glacier Locations // Arctic and Alpine Research. 8.1 (1976). – P. 79–90.
24. *Hambrey M., Alean J.* 2004. *Glaciers*, 2nd ed. Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge Univ. Press. – 376 p.
25. *Harvey R.P., Schutt J.W.* 1997. Meteorite recovery and reconnaissance in the Walcott N ev e region of the Transantarctic Mountains, 1997–1998 // US Antarctic J. 31, 32–34.
26. *Jenks G. F.* 1967. The Data Model Concept in Statistical Mapping // Intern. Yearbook of Cartography. 7: 186–190.
27. *Lewis W.V.*, 1960. The problem of cirque erosion // W.V. Lewis / ed., Norwegian Cirque Glaciers. R.G.S. Res. Series, 4, Royal Geographical Soc., London, 97–100.
28. *Lubnina N., Mertanen S., Soderlund U.* et al. 2010. A new key pole for the East European Craton at 1452 Ma: Palaeomagnetic and geochronological constraints from mafic rocks in the Lake Ladoga region (Russian Karelia) // Precamb. Res. 183. 3. – P. 442–462.
29. *Nelson F.E.N., Jackson, L.E. Jr.* 2003. Cirque forms and alpine glaciation during the Pleistocene, West-Central Yukon // Yukon exploration and geology 2002 / edited by D.S. Emond and L.L. Lewis. Exploration and Geological Services Division, Yukon Region, Indian and Northern Affairs Canada – P. 183–198.
30. *Ritter D.F., Kochel R.C., Miller J.R.*, 1995. Process Geomorphology 3rd Ed.: W.C. Brown Publishers, Dubuque, Iowa. – 546 p.
31. *Turnbull J.M., Davies T.R.H.* 2006. A mass movement origin for cirques. Earth Surface Processes and Landforms. 31(9). – P. 1129–1148.

*Амантов Алексей Владиславович* – канд. геол.-минер. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ. <4448470@mail.wplus.net>.  
*Амантова Марина Геннадьевна* – инж. 2 кат., ВСЕГЕИ.