

- [7] Okeanologiya. Fizika okeana. T.1. M.: Nauka, 1978. 455 s.
[8] Otnes R., E'nokson L. Prikladnoj analiz vremennyh ryadov. M.: Mir, 1982. 428 s.
[9] Rozhkov V. A. Statisticheskaya gidrometeorologiya. Chast' 2. Turbulentnost' i volny. SPb.: Izd-vo SPbGU, 2013. 215 s.
[10] Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M. Global observations of nonlinear meso-scale eddies // Progress in oceanography. 2011. Vol. 91. P. 167—216.

Изв. РГО. 2015. Т. 147, вып. 4

СТРУКТУРНАЯ ГЕОМОРФОЛОГИЯ БЕЛОМОРСКОГО РЕГИОНА НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ В СРЕДЕ ГИС

© **И. С. СЕРГЕЕВ**,¹ **И. В. ЕГОРОВ**²

Санкт-Петербургский государственный университет
E-mail: ¹ igorsergeev.spb@gmail.com,
² ieg@mail.ru

Рассматривается морфометрический метод фрактального анализа структурных форм рельефа на примере рельефа Беломорского региона. Данный количественный метод основан на положениях фрактальной геометрии, обоснованной в 1977 г. математиком Б. Мандельбротом. Фрактальная делимость поверхности, подтверждаемая эрозионной сетью, в большей степени является следствием сложной физической природы тектонических нарушений земной коры. Это позволяет качественно и количественно определять границы разнопорядковых геоморфологических структур на поверхности Земли и выявлять их тектоническое продолжение в глубинах земной коры. Использование цифровой модели рельефа в среде ГИС в значительной степени позволило оптимизировать вычисление тектонических границ и получить значимые результаты о глубинах заложения разломов в земной коре Беломорского региона и сопоставить с геофизическими глубинными профилями. Данный метод, кроме геоморфологии, возможно, будет полезен в смежных науках: инженерной геологии, динамической геологии, ландшафтоведении, в поисковой геологии и др.

Ключевые слова: фракталы, географические информационные системы, цифровая модель рельефа, структурный рельеф, тектонические нарушения.

Введение. При рассмотрении любой территории на земном шаре уделяется внимание развитию ее водно-эрозионной сети. В геоморфологии применяются специальные названия для различного пространственного распределения водотоков. Например, существуют следующие виды гидросетей: радиальный, концентрический, перистый, древовидный, решетчатый. Тем самым подчеркивается наличие пространственной упорядоченности водотоков и соответствующих форм рельефа. Рельеф земной поверхности является средоточием и объектом проявлений как эндогенных, так и экзогенных процессов. Рельеф несет в себе информацию о динамических процессах, происходящих в литосфере, атмосфере и гидросфере. Существует множество определений термина рельеф, например: «Рельеф — совокупность всех форм земной поверхности для каждого конкретного участка и Земли в целом. Образуется в результате взаимного воздействия на земную кору эндогенных и экзогенных процессов» [4]. В данном определении отражена функциональная связь между формой и процессом, а также указывается на важнейшее свойство

рельефа — масштабируемость без потери связи с рельефообразующими процессами.

Геоморфология зачастую рассматривает и изучает разномасштабные объекты. Например, объект, на любой карте обозначенный как поднятие, при увеличении масштаба распадается на несколько возвышений, а при рассмотрении его на местности каждое возвышение представляется несколькими холмами, каждый холм в свою очередь разбит овражно-балочной сетью и т. д. Это масштабно-инвариантные геометрические образы. В математике подобные геометрические структуры были названы фракталами. Данное название происходит от латинского *fractus* — «дробленный». Понятие введено математиком Б. Мандельбротом. Фрактал — это множество, обладающее свойствами самоподобия, т. е. в различных шкалах измерения любая часть фрактала подобна всему множеству. Фрактал обладает нетривиальной структурой при любом масштабе восприятия, в этом заключается отличие от таких регулярных структур, как эллипс, окружность, график гладкой функции: на малом своем фрагменте они вырождаются в прямую. Для фрактала изменение масштаба не ведет к вырождению, это свойство отражает принципы организации материи во Вселенной. Как показывает Б. Мандельброт в своей работе [8], фрактальная геометрия более полно описывает формы, присущие природе, и, надо полагать, отражает динамические явления окружающего мира.

Фрактальные множества характеризуются дробной размерностью. В евклидовой геометрии определено существование целочисленной размерности как степени, в которую возводится значение измерения. Например, точка имеет размерность, равную нулю. Нуль — это показатель степени, в которую возводится значение точки, и получается всегда значение 1, которое указывает на существование геометрического объекта. Аналогичные рассуждения евклидова геометрия применяет для линии, плоскости, объема. Геометрия («измерение Земли», греч.), используя абстракции, стремится точно описать окружающее пространство. Тем самым геометрическая теория позволяет решать геоморфологические задачи на определенном масштабном уровне, при этом исследователь сам задает масштаб и границы применимости геометрических принципов. Но зачастую при этом теряется часть информации о системообразующих связях, так как система всегда существует на разных масштабных уровнях. Фрактальная геометрия предоставляет возможность рассматривать природные объекты, существующие в разных масштабных шкалах, при этом размерность объекта становится дробной, что означает: точка может быть образована множеством, линия, как правило, образует сеть, у поверхности все-таки есть некоторый объем, когда она, например, является границей раздела среды. Примером может служить поверхность овражно-балочной сети, описываемая множеством с размерностью от 2 до 3. Тальвеги этой сети заполняются водотоками, которые формируют фрактал гидросети размерностью от 1 до 2 [8, 9, 11]. Разреженное состояние атмосферы по сравнению с другими оболочками Земли аналогично «канторовской» [8] фрактальной модели с размерностью от 0 до 1.

В современных условиях с применением географических информационных систем (ГИС), при возможностях наращивания информации об исследуемом объекте до колоссальных величин появляется возможность более точно отобразить пространственные характеристики форм рельефа. На этой основе, используя принципы фрактальной геометрии, возможно выявить пространственные границы морфоструктур земной поверхности.

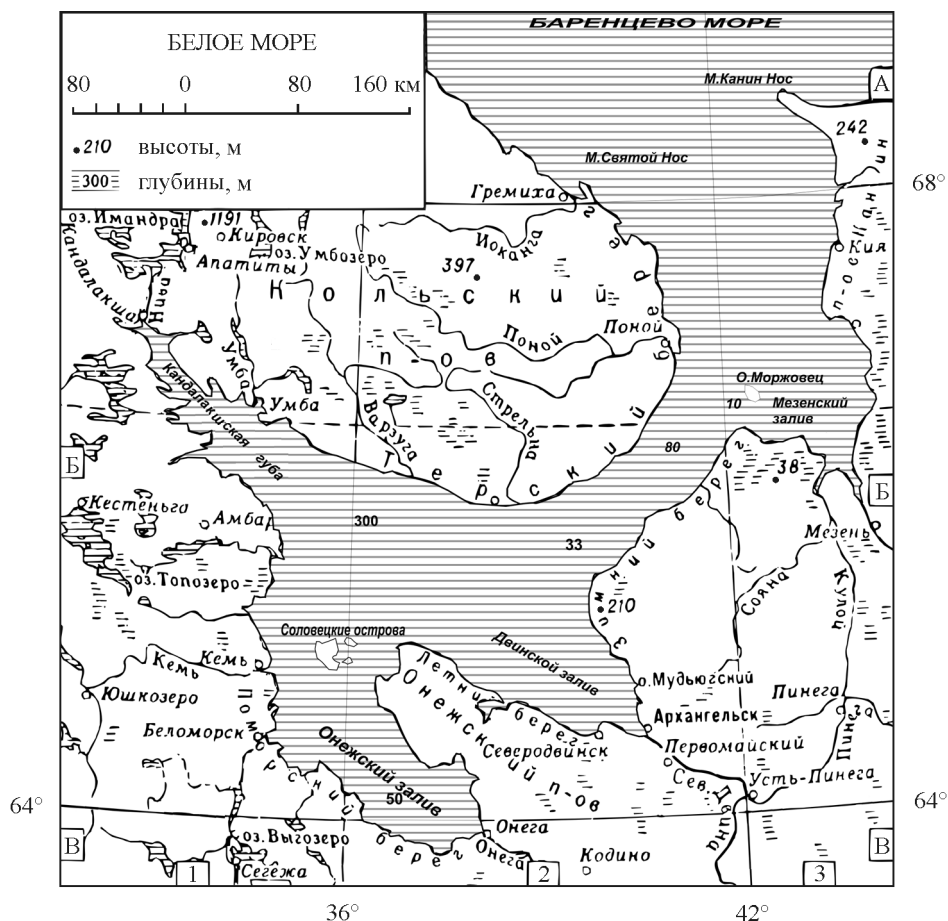


Рис. 1. Район исследований [13].

Объект исследования. Объектом изучения является Беломорский регион (рис.1), его геоморфологическое и тектоническое строение. Впадина Белого моря приурочена к древнейшей протерозойской структуре земной коры — Беломорскому авлакогену. Кроме того, севернее, в районе Мезенского залива, Горло Белого моря пересекает Кулойский авлакоген. Беломорский авлакоген представляет собой прогиб в земной коре, который сформировался в рифее на стадии дробления консолидированного в нижнем протерозое кристаллического фундамента, предшествующей началу формирования платформенного чехла. В позднерифейское время этот прогиб был заполнен осадками, часть из которых в настоящее время вскрывается на южном берегу Кольского полуострова (Терская свита), а большая часть слагает центральный беломорский бассейн.

Состав осадков — преимущественно терригенный и представлен переслаиванием песчаников, алевролитов, аргиллитов, в которых иногда фиксируются толщи вулканитов [10]. Белое море является своеобразной границей распространения палеозойского осадочного чехла Русской равнины: к северо-западу на поверхности наблюдаются протерозойско-архейские метаморфические породы Балтийского кристаллического щита.

Теоретические основы и методы. Наиболее активные и динамичные геоморфологические процессы пространственно тяготеют к границам менее подвижных и более плотных объектов. Принцип организации природных объектов заключается в максимальном наполнении пространства для осуществления энергетического обмена при наименьшем возможном потенциальном уровне — это соответствует принципам построения фрактальных геометрических образов. Например, крона дерева, являясь классическим примером фрактального объекта, состоит из множества ветвей (и листьев в период вегетации), которые имеют минимальную массу, но максимальную поверхность для осуществления транспирации и фотосинтеза. С другой стороны, на некотором удалении крона дерева кажется сферой, но сфера, как известно, имеет минимальную удельную поверхность и соответственно непригодна для эффективного обмена энергией. Подобная двойственность природных объектов указывает на их сложный характер энергетического взаимодействия с окружающей средой.

Возможности образования фрактальных объектов в земной коре заключены в энергии плотной литосферной оболочки Земли. Энергия, содержащаяся в кристаллических связях, в массе горных пород определяется в параметрах давления—температуры (P — T условия) и кинематическом движении масс. В условиях небольших глубин, когда давление и температура относительно низки, большее выражение находят эффекты относительных перемещений, скольжения по плоскостям отрыва, вертикальные и горизонтальные тектонические перемещения [7]. Разрушение горных пород под действием тектонических напряжений приводит к образованию трещин. В структурной геологии, сейсмотектонике, неотектонике широкое развитие получили методы изучения тектонической трещиноватости пород. Одно из направлений, изучающее тектоническое дробление горных пород, называемое дислокационным, указывает на то, что в процессе упругопластического деформирования толщ горных пород преобразование части упругих деформаций в необратимые может осуществляться как за счет сдвигов по вновь образующимся трещинам, так и за счет смещения стенок уже существующих разрывов различного масштабного уровня. При этом каждое смещение вдоль поверхности трещины возмущает поле напряжений только нижележащего масштабного уровня и не влияет на кинематику данной трещины. «После формирования складок, релаксационные возможности которых тоже исчерпываются, за счет увеличения трения между слоями на крыльях растущих складок образуются тектонические разрывы и деформация переходит на новый структурный уровень — уровень блоков... при переходе деформации на уровень блоков изменяются масштабы и механизмы релаксации напряжений, а также резко перестраивается характер деформационного процесса. На этой стадии деформация системы происходит путем перемещения и поворотов новообразованных блоков, а деформация внутри системы локализуется (концентрируется) на границах блоков в зонах тектонических разрывов» [7, с. 79].

Дислокационное направление в структурной геологии показывает, что с каждой системой трещин связано свое поле тектонических напряжений (энергии), которое контролирует существование системы более низкого масштаба. Основой такой зависимости, как отмечалось выше, служит принцип максимального заполнения системой пространства при минимальных энергетических затратах [7, с. 276]: «...с того момента как трещина достигла определенных размеров, вся упругая энергия из напряженной области поглощается

трещиной. Теперь процессы пластической деформации если и протекают, то в непосредственной близости от вершины трещины и ее полости — процесс становится хрупким. Трещина может расти, поддерживая скорость, неограниченно долго — при достаточно большом размере тела, в котором она распространяется, и наличии потока энергии. При больших, близких к максимальным скоростям прорастания трещины испытывают ветвление, разделяясь на две или три, каждая из которых способна ветвиться далее. На каждой стадии ветвления скорость развития трещины падает до нуля, и затем начинается новый разгон. Это происходит потому, что упругая энергия, расходуемая на разрушение, тратится на компенсацию резко возросшей поверхностной энергии трещины в момент ветвления». Таким образом, тектонические трещины имеют ярко выраженные фрактальные формы своего развития. Достигая поверхности Земли, тектонические трещины, надо полагать, формируют соответствующие фрактальные формы рельефа. Для правильного отображения крайней неоднородности морфологического облика земной поверхности воспользуемся понятием фрактальной размерности.

На поверхности Земли отображением первичной фрактальной тектонической трещиноватости земной коры является речная сеть. Агентом, который постоянно изменяет и преобразует рельеф, препарирует геологические структуры по зонам тектонической трещиноватости, а также участвует в глобальном литодинамическом потоке [12], является водоток. Совокупность всех водотоков исследуемого района составляет единую эрозионную сеть. Исследования рисунков эрозионных сетей подтверждают их фрактальные свойства в определенном интервале масштабов [9, 11]. Водотоки в силу своей подвижности и подчиненности гравитационному полю Земли располагаются в понижениях рельефа — участках, имеющих отрицательную кривизну поверхности, соответствующих килевым линиям рельефа. На этом свойстве водотоков основано выделение их положения на цифровых моделях рельефа (ЦМР) [15]. Для морского дна рисунок килевых линий также отображает формы тектонического рельефа, до некоторой степени сглаженного процессами аккумуляции. Учитывая вышесказанное, примем за основу то, что формы тектонических дислокаций образуют фрактальные системы, подтверждаемые эрозионной сетью на дневной поверхности, и являются основой блокового строения рельефа земной поверхности.

В толще земной коры вещество находится под большим давлением. Чем ближе к поверхности, тем меньше литостатическое давление — структура вещества все более освобождается от сжимающих сил и начинает образовывать участки релаксации в толще, т. е. наблюдается процесс выделения энергии. Максимальная релаксация будет наблюдаться на дневной поверхности, где давление равно только 1 атм — это в том числе проявляется в значительном развитии экзогенных процессов и формировании зоны гипергенеза. Как известно из законов Ньютона, полная потенциальная энергия объекта массой m пропорциональна расстоянию его от центра Земли. Важна относительная часть потенциальной энергии тектонического объекта, равная разности высот подошвы и кровли. Таким образом, любой тектонический блок «принужден» утончаться по вертикали. В условиях больших масс и давлений фигуре, наиболее отвечающей этим принципам, соответствует пластина, расположенная эквипотенциально в гравитационном поле. Данное обстоятельство подтверждается сейсмоакустическими исследованиями земных недр — в действительности все земные слои подобны тонким пленкам по отношению к горизонта-

льному размеру профиля. Для процесса передачи внутренней энергии (энергии связей кристаллических решеток — Р—Т условия) к поверхности Земли важна площадь объекта. Удельная площадь поверхности тектонического блока растет при тектонической фрагментации объекта. То есть объективно существуют два процесса, отвечающих за рассеяние энергии земных глубин: первый контролирует расслоение в вертикальном направлении на субгоризонтальные слои, второй — фрагментирует слои на тектонические блоки в горизонтальном направлении субвертикальными разломами. Данные взаимодействия характеризуют пространственные степени свободы тектонического блока и его возможные смещения. Это позволяет системам тектонических блоков в геологическом масштабе перераспределять поступающую энергию без какой-либо значимой перестройки внутренней структуры и отвечает принципам устойчивости системы. Если образно представить совокупность тектонических разломов, то она подобна кроне дерева в верхнем срезе (в приповерхностной части земной коры), а глубже находятся более толстые «ветви» и узлы тектонических нарушений, и где-то в основании литосферы, возможно, находится «ствол» данной системы. Например, по данным геофизического изучения земной коры горные системы имеют пониженный фундамент [1], а значит и большую глубину заложения тектонических блоков, отвечающих за их морфологический облик. Мы в праве полагать, что тектоническая система едина в энергетическом аспекте — нижний уровень соответствует высокому значению внутренней энергии, выраженной в таких физических величинах, как давление и температура. Этот уровень находится на большой глубине. При подъеме выше давление и температура падают нелинейно [5] — это, по нашему мнению, является выражением развития сети тектонических блоков и их кинематических перемещений по поверхностям раздела среды. Тектоническая фрактальная структура проявляется на поверхности Земли в виде морфоблоков — любых сколько-нибудь значимых геоморфологических объектов: от горных хребтов, плоскогорий до отдельно стоящих холмов и сопкок. Например, А. Б. Кирмасов отмечает дискретность пространственного размещения кимберлитовых трубок далдынского поля в Якутии и указывает на фрактальную зависимость между числом тектонических разрывов, проявленных в рельефе, и амплитудой [7]. В зависимости от масштаба рассмотрения региона выделяются разные по уровню организации фрактальные системы тектонических трещин земной коры. Уменьшение масштаба ведет к обобщению и генерализации элементарных ячеек ЦМР и, как следствие, отображению морфоструктур более высокого порядка.

Объект исследования, представленный цифровой моделью рельефа [14], был подвергнут обработке модулем «hydrology» пакета ArcGIS. Было выделено четыре масштабных уровня блоковой организации рельефа с масштабными коэффициентами: 10^{-6} , $5 \cdot 10^{-6}$, $1.1 \cdot 10^{-5}$, $2.1 \cdot 10^{-5}$, соответствующих разрешению (размеру пикселя Md) цифровой модели, равному 1, 5, 11 и 21 км. На рис. 2, как пример, показаны два уровня фрактальной организации тектонических блоков масштабов $1.1 \cdot 10^{-5}$, $2.1 \cdot 10^{-5}$. Для полученных полигональных объектов были вычислены значения площадей, периметров и ранговых значений высот морфоблоков. Данные значения использованы в проводимом ниже анализе на основе принципов фрактальной геометрии.

Фрактальный анализ. Для фрактальных объектов существует зависимость между площадью объекта S и его периметром P . Величиной этой зави-

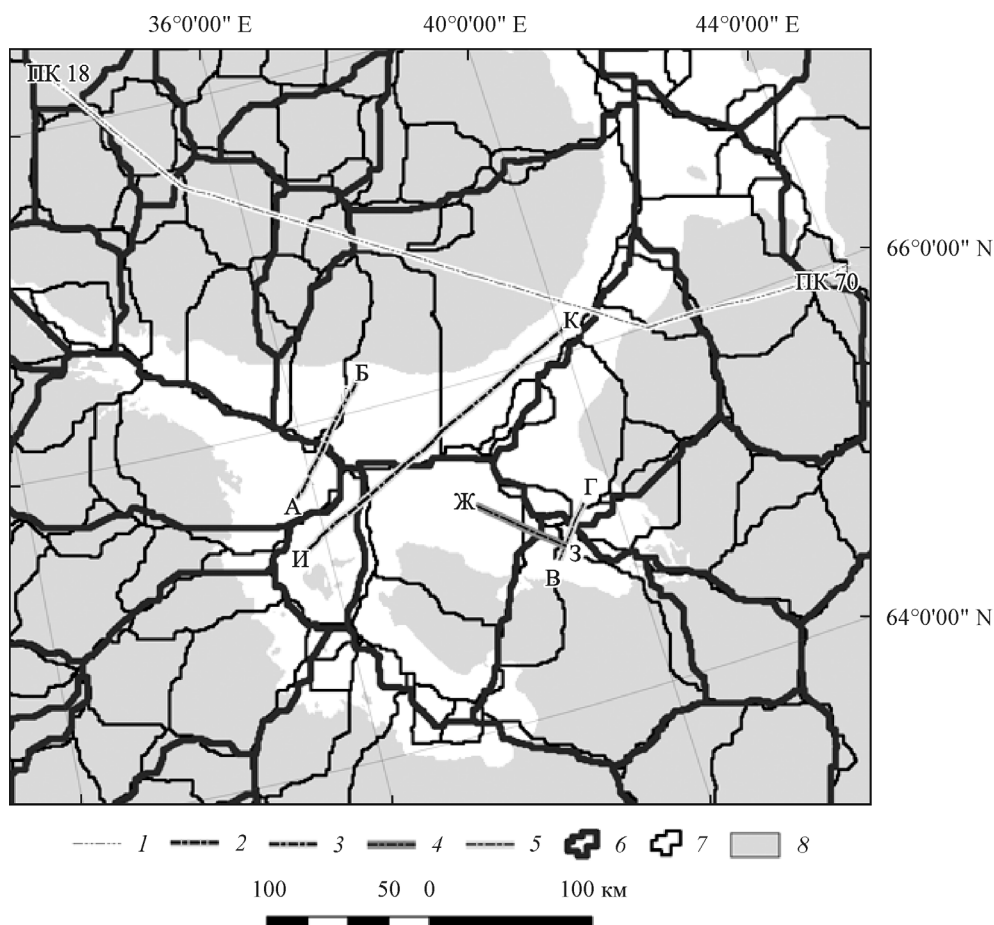


Рис. 2. Границы разнопорядковых морфоструктур, выделенных по ЦМР, и положение характерных геофизических профилей Беломорского региона.

1 — сейсмический профиль «кварц 1986» 18 ПК–70 ПК; 2 — профиль И–К; 3 — профиль А–Б; 4 — профиль Ж–З; 5 — профиль В–Г; 6 — границы морфоблоков, $Md = 21$ км; 7 — границы морфоблоков, $Md = 11$ км; 8 — суша.

симости является фрактальная размерность d . Связь между d , периметром P , площадью S и объемом V морфоблока выражается [8]:

$$P^{\frac{1}{d}} = cS^{\frac{1}{2}} = kV^{\frac{1}{3}}, \quad (1)$$

где c и k — коэффициенты пропорциональности.

Примем, что c равно единице, тогда фрактальная размерность морфоблока определяется как:

$$d = \frac{2 \ln P}{\ln S}. \quad (2)$$

Приняв равенство периметра скрытой части периметру дневной поверхности морфоблока, можем записать:

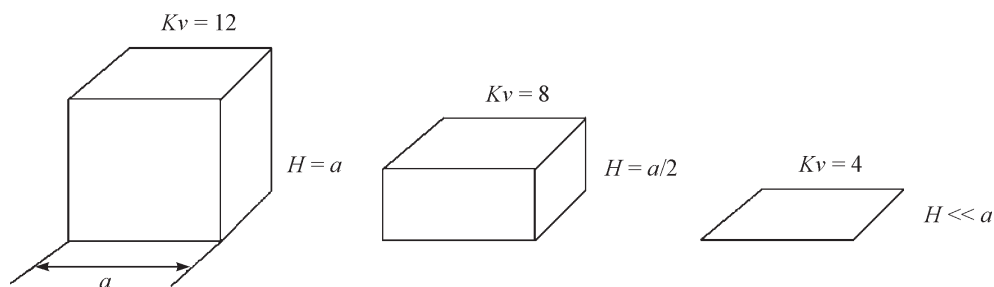


Рис. 3. Значение коэффициента формы.

$$(2P)^{\frac{1}{d}} = Kv S^{\frac{1}{3}} H^{\frac{1}{3}}, \quad (3)$$

где H — глубина морфоблока, Kv — коэффициент формы объекта, для плоских объектов (у которых одно из измерений много меньше любых других измерений) стремится к 4, а для массивной призмы приближается к 12. В нашем случае примем Kv равным четырем (пояснение на рис. 3).

На основании полученного значения d (2) для каждого морфоблока определим глубину заложения тектонических нарушений, отсчитываемую от базисного значения Hb рельефа в границах, соответствующих выделенным морфоблокам Ht по (3):

$$Ht(x, y) = -\exp(3 / D \ln P + 3 \ln 2 - 3 \ln Kv - \ln S) + Hb, \quad (4)$$

где x и y — географические координаты, D — фрактальная размерность морфоблока.

Все вычисления были выполнены также с применением программы ArcGIS. Результат расчета заложения трех уровней тектонических нарушений в земной коре показан в изометрической проекции на рис. 4. Структурный уровень -2 км соответствует тектоническим разломам, образующим малые морфоблоки (площадью единицы—десятки квадратных километров), уровень -5 км соответствует поверхности заложения разломов, формирующих морфо-

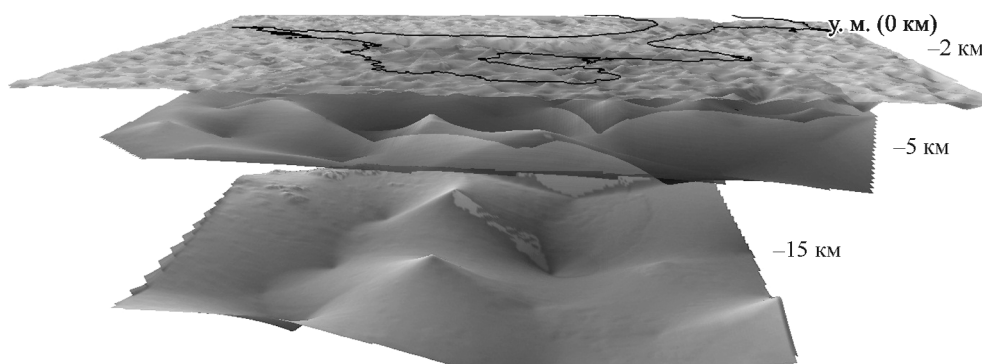


Рис. 4. Модель заложения фундамента морфоструктур в земной коре под дном Белого моря.

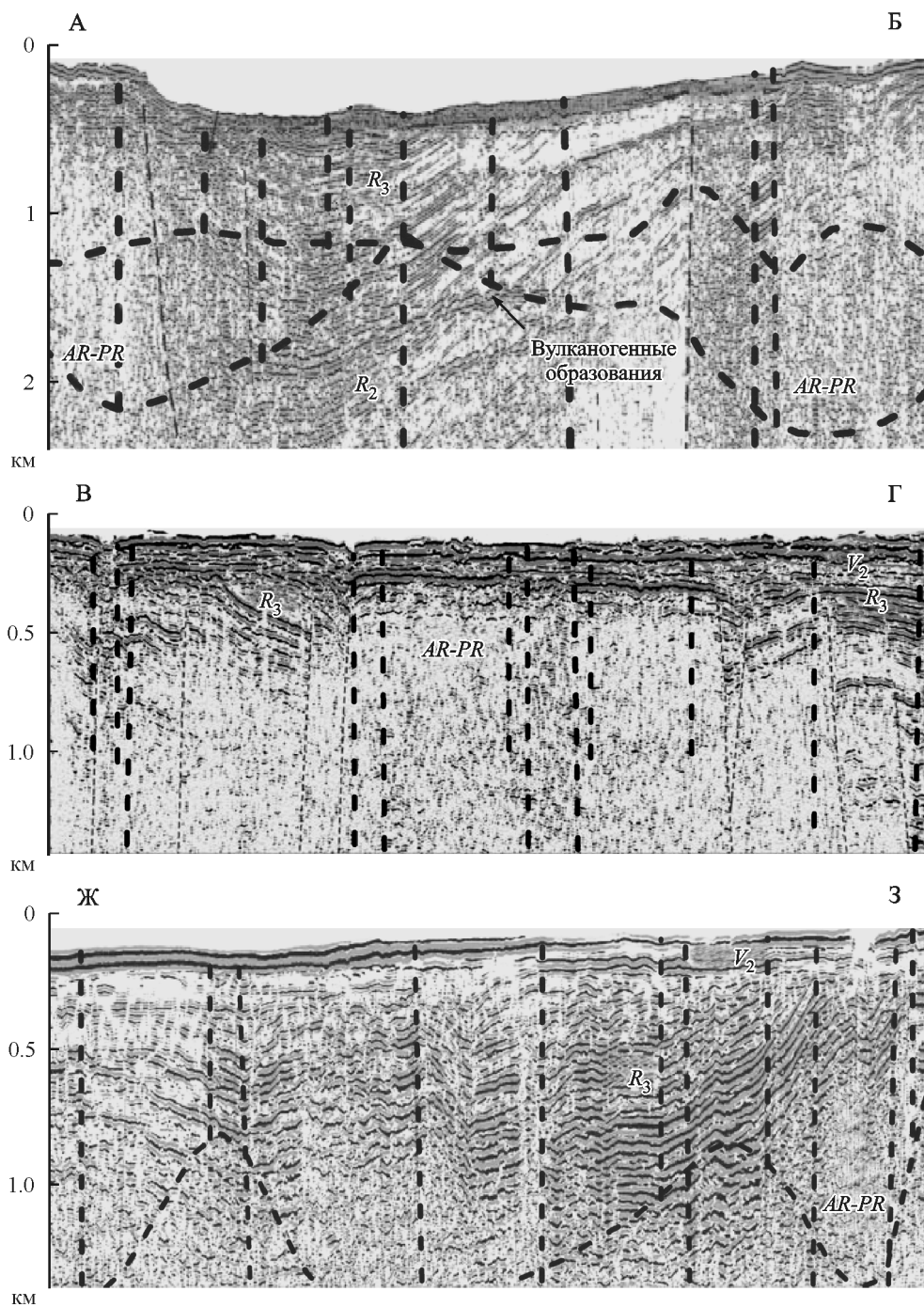


Рис. 5. Расположение расчетных тектонических границ на соответствующих сеймоакустических профилях [6] в пределах дна Белого моря (рис. 2): А—Б, В—Г и Ж—З.

Тектонические границы показаны черной штриховой линией.

структуры площадями десятки—сотни квадратных километров, и самый нижний уровень соответствует морфоструктурам с площадями тысячи квадратных километров.

Результаты исследования. В ходе фрактального анализа морфоструктурного рельефа выполнен ряд сравнений геофизических профилей (их расположение показано на рис. 2) и положения расчетных тектонических границ (рис. 5—7) с сейсмическими и сейсмоакустическими данными, имеющимися в доступной литературе [6, 1].

Сопоставление расчетных границ глубин заложения тектонических блоков с данными, полученными на сейсмоакустических и сейсмическом профилях (рис. 5, 6), указывает на 60—80%-ное совпадение расчетных границ с геофизическими границами. Появление субвертикальных тектонических нарушений с определенной глубины соответствует релаксации накопленных деформаций в слое соответствующей мощности (глубины). Чем ближе к поверхности слой, тем более дробится земная кора (рис. 7), что подтверждает заложение системы разломов Кандалакшского грабена и Беломорского шва, который ограничивает Керецкий грабен.

Поднятие нижней границы разломов уровня, соответствующего масштавному коэффициенту $1.1 \cdot 10^{-5}$ ($Md = 11$ км), над Керецким грабеном (на рис. 6 это соответствует участку профиля между пикетами 56 и 60) свидетельствует о высоком значении внутренней энергии в толще нижележащих горных пород. И наоборот, понижение данного уровня в районе Кандалакшского грабена указывает на «налаженный» процесс выхода эндогенной энергии через его систему разломов, продолжающихся в Северодвинский грабен (рис. 7).

Заключение. В ходе исследования выделены границы разнопорядковых морфоструктур поверхности Беломорского региона на основе тектонической фрактальной фрагментации земной поверхности, выраженной водно-эрозионной сетью и килевыми линиями рельефа. Рассмотрено применение количественных методов на основе фрактальных зависимостей между протяженностью границ и площадью морфоструктур для определения их глубинного заложения в земной коре. Полученные результаты о положении тектонических границ морфоструктур в большей части совпадают с глубинными геофизическими исследованиями Беломорского региона, проведенными в разные годы [1, 6]. Таким образом, на первоначальном этапе подтвержден метод исследования блоково-слоистого строения земной коры на основе изучения морфометрических свойств земной поверхности в среде ГИС. Развитие фрактальных принципов в геоморфологии открывает новые возможности в изучении блокового строения Балтийского щита [2, 3], прилегающего шельфа и других территорий, а также дна Мирового океана.

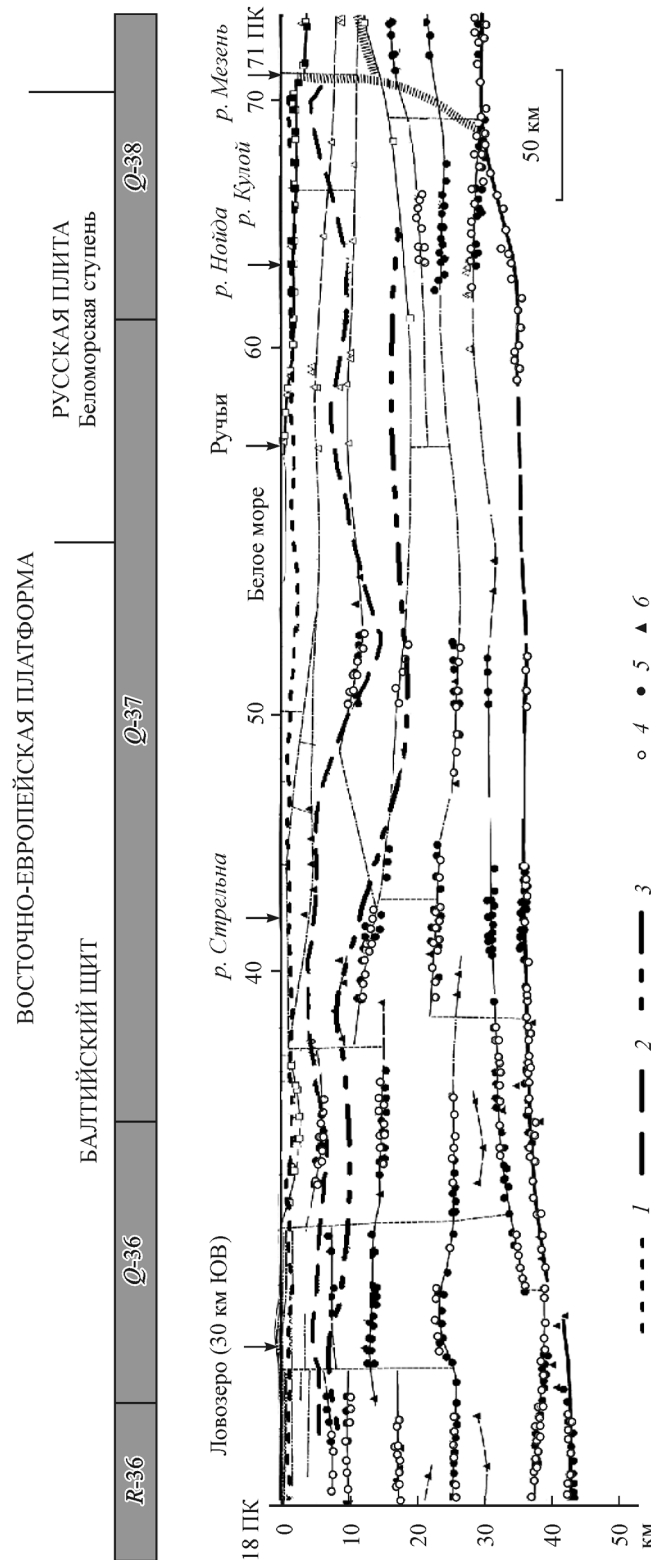


Рис. 6. Сравнение данных геофизического профиля $[\text{1}]$ (с изменениями) с расчетными данными фрактального анализа тектонических границ. Расчетные границы глубин тектонических блоков по данным фрактального анализа при коэффициенте масштаба ЦМР: 1 — 5 км, 2 — 11 км, 3 — 21 км; геофизические отметки глубин отражающих границ по волнам: 4 — поперечным, 5 — продольным, 6 — глубины границ обмена по землетрясениям; остальные обозначения — по Атласу опорных геолого-геофизических профилей России издательства ВСЕГЕИ (2013 г.).

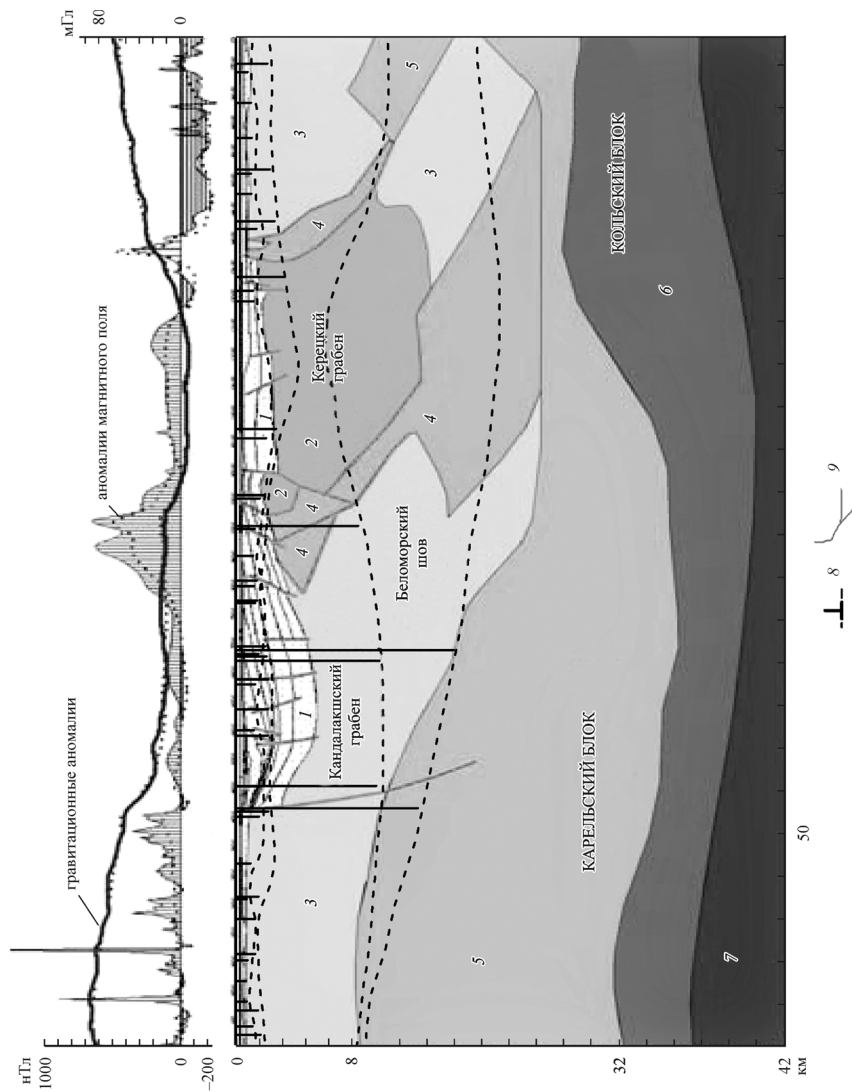


Рис. 7. Сопоставление данных фрактального анализа с геолого-геофизической моделью (по Журавлеву В. А. [6] с добавлениями), профиль И—К.

Цифрами и соответствующим тоном обозначены: 1 — осадочный чехол; 2 — граниты, мигматиты; 3 — гнейсы, сланцы; 4 — основные интрузии; 5 — средняя кора (гранулитно-базитовый слой); 6 — нижняя кора (базитовый слой); 7 — верхняя мантия; 8 — тектонические нарушения и их глубины по данным фрактального анализа; 9 — тектонические границы по геофизическим данным.

Список литературы

- [1] Атлас «Опорные геолого-геофизические профили России». Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год. Электронное издание. СПб.: ВСЕГЕИ, 2013.
- [2] Воеводова Г. П., Савицкий А. В. Принципы и методика выделения блоков и основных элементов глубинного строения северо-запада Русской платформы // Блоковая тектоника и перспективы рудоносности северо-запада Русской платформы. Л., 1986. С. 5—21.
- [3] Гендлер В. Е., Белкина И. Л., Берендеев Н. С., Гершаник С. Ю. Использование космических данных для изучения глубинного строения земной коры Карело-Кольского региона // Блоковая тектоника и перспективы рудоносности северо-запада Русской платформы. Л., 1986. С. 52—62.
- [4] Геологический словарь. Т. 1. М., 1978. 486 с.
- [5] Глазнев В. И. Термический режим земной коры северо-восточной части Балтийского щита // Геофизические исследования на Европейском севере СССР. Апатиты, 1983. С. 88—97.
- [6] Журавлев В. А. Структура земной коры Беломорского региона // Разведка и охрана недр. 2007. № 9. С. 22—26.
- [7] Кирмасов А. Б. Основы структурного анализа. М., 2011. 368 с.
- [8] Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Пер. с англ. Логунова А. Р. М., 2002. 664 с.
- [9] Мельник М. А. Фрактальный анализ извилистости рек (на примере Томской области) // Вестн. Томского гос. ун-та. 2010, вып. 335. С. 168—176.
- [10] Рыбалко А. Е., Лисицын А. П., Шевченко В. П., Журавлев В. А., Варламова А. А., Никитин М. А. Новые данные о геологическом строении четвертичного покрова Белого моря // Матер. Междунар. науч. конф. Ростов-на-Дону, 2009. С. 286—288.
- [11] Сидорчук А. Ю. Фрактальная геометрия речных сетей // Геоморфология. 2014, вып. 1. С. 3—14.
- [12] Флоренсов Н. А. Очерки о структурной геоморфологии. М., 1978. 239 с.
- [13] Электронный ресурс: «Большая Советская Энциклопедия» URL: <http://bse.sci-lib.com/article107048.html>.
- [14] British Oceanographic Data Centre. URL: http://www.gebco.net/data_and_products/gebco_world_map/ (дата обращения 03.04.2014).
- [15] Environmental Systems Research Institute, Inc. URL: <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/> (дата обращения 11.12.2014).

Поступило в редакцию
16 января 2015 г.

Structural geomorphology of the White Sea region on the basis of fractal geometry in GIS environment

© I. S. Sergeev,¹ I. V. Egorov²

Saint Petersburg State University
E-mail: ¹ igorsergeev.spb@gmail.com
² ieg@mail.ru

The article describes a method of fractal analysis of structural landforms on the example of relief the White Sea region. This method is based on the provisions of fractal geometry suggested in 1977 by B. Mandelbrot. Using a digital elevation model in GIS software environment ArcGIS 9.3 significant results were yielded on the depth of the tectonic disturbances in the Earth's crust of the White Sea region comparable with the geophysical profiles. The fractal features of the surface confirmed by erosive network are to a greater degree a consequence of the physical nature of tectonic violations of crust; it allows to define qualitatively and quantitatively the borders of multi-ordinal geomorphologic structures on Earth surface, and to reveal their tectonic continuation in crust depths. This method may be useful in a number of disciplines: geomorphology, dynamic geology, landscape studies, and search geology.

Key words: fractals, geographic information systems, digital elevation model, structural relief, tectonic faults.

Reference

- [1] Atlas «Opornye geologo-geofizicheskie profili Rossii». Glubinnye seismicheskie razrezy po profilyam GSZ, otrabotannym v period s 1972 po 1995 god. E'lektronnnoe izdanie. SPb.: VSEGEI. 2013.
- [2] Voevodova G. P., Savickij A. V. Principy i metodika vydeleniya blokov i osnovnyh e'lementov glubinnogo stroeniya severo-zapada Russkoj platformy // Blokovaya tektonika i perspektivy rudosnosti severo-zapada Russkoj platformy. L., 1986. S. 5—21.
- [3] Gendler V. E., Belkina I. L., Berendeev N. S., Gershanik S. Yu. Ispol'zovanie kosmicheskix dannyh dlya izucheniya glubinnogo stroeniya zemnoj kory Karelo-Kol'skogo regiona // Blokovaya tektonika i perspektivy rudosnosti severo-zapada Russkoj platformy. L., 1986. S. 52—62.
- [4] Geologicheskij slovar'. T. 1. M., 1978. 486 s.
- [5] Glaznev V. I. Termicheskij rezhim zemnoj kory severo-vostochnoj chasti Baltijskogo shhita // Geofizicheskie issledovaniya na evropejskom severe SSSR. Apatity, 1983. S. 88—97.
- [6] Zhuravlev V. A. Struktura zemnoj kory belomorskogo regiona // Razvedka i ohrana neдр. 2007. N 9. S. 22—26.
- [7] Kirmasov A. B. Osnovy strukturnogo analiza. M., 2011. 368 s.
- [8] Mandel'brot B. Fraktal'naya geometriya prirody / Per. s angl. Logunova A. R. M., 2002. 664 s.
- [9] Mel'nik M. A. Fraktal'nyj analiz izvilistosti rek (na primere Tomskoj oblasti) // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Vyp. 335/2010. Tomsk, 2010. S. 168—176.
- [10] Rybalko A. E., Lisicyn A. P., Shevchenko V. P., Zhuravlev V. A., Varlamova A. A., Nikitin M. A. Novye dannye o geologicheskom stroenii chetvertichnogo pokrova Belogo morya // Mater. Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. Rostov-na-Donu, 2009. S. 286—288.
- [11] Sidorchuk A. Yu. Fraktal'naya geometriya rechnyh setej // Geomorfologiya. 2014. Vyp. 1. S. 3—14.
- [12] Florensov N. A. Oчерки о структурной геоморфологии. M., 1978. 239 s.

- [13] E'lektronnyj resurs: «Bol'shaya Sovetskaya E'nciklopediya» URL: <http://bse.sci-lib.com/article107048.html>.
- [14] British Oceanographic Data Centre. URL: http://www.gebco.net/data_and_products/gebco_world_map/ (data obrashheniya 03.04.2014).
- [15] Environmental Systems Research Institute, Inc. URL: <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/> (data obrashheniya 11.12.2014).

Изв. РГО. 2015. Т. 147, вып. 4

СВИДЕТЕЛЬСТВА СРЕДНЕГОЛОЦЕНОВОЙ ТРАНСГРЕССИИ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА ПО ДАННЫМ ДИАТОМОВОГО АНАЛИЗА

© А. В. ЛУДИКОВА

Институт озероведения РАН
E-mail: ellerbeckia@yandex.ru

*Посвящается светлой памяти Натальи Наумовны Давыдовой (1931—2014),
чей вклад в развитие диатомового анализа
и изучение истории Ладожского озера невозможно переоценить.*

Несмотря на более чем столетнюю историю изучения, пространственно-временные рамки ладожской трансгрессии, а также сама возможность столь значительного подъема уровня Ладожского озера в среднем голоцене до сих пор остаются дискуссионными. Данная работа посвящена анализу накопленных к настоящему времени материалов, предоставляющих свидетельства ладожской трансгрессии по данным диатомового анализа. Особенности состава диатомовых комплексов отложений из геологических разрезов, археологических памятников и озерных кернов позволили выделить группу видов-индикаторов трансгрессии. Показана перспективность применения диатомового анализа при установлении высотных и хронологических пределов распространения трансгрессии.

Ключевые слова: диатомовый анализ, ладожская трансгрессия, средний голоцен.

Введение. Гипотеза о значительном повышении уровня Ладожского озера в среднем голоцене была выдвинута шведским геологом Г. де Геером еще в конце XIX в., и в дальнейшем была принята и развивалась зарубежными (Ю. Айлио, Е. Хюппя, М. Саарнисто) и отечественными исследователями (К. К. Марков, Д. Д. Квасов, Д. Б. Малаховский, Д. А. Субетто и др.). В настоящее время под ладожской трансгрессией принято понимать повышение уровня озера, начавшееся около 5000 лет назад (л. н.; здесь и далее приводится радиоуглеродный возраст) и завершившееся около 3000 л. н. образованием р. Невы и падением уровня Ладоги до современных отметок [18, 22]. Основной причиной трансгрессии стало неравномерное гляциоизостатическое поднятие северной и южной частей ладожской котловины, в результате которого сток из озера, располагавшийся в северной части Карельского перешейка, постепенно терял свою пропускную способность, тогда как в южном Приладожье, в свою очередь, происходило постепенное подтопление побережья. Очевидно, значительный вклад в повышение уровня Ладожского озера внесло образование около 5000 л. н. р. Вуоксы [26], в настоящее время одного из основных притоков Ладоги. Общее увеличение объема водной массы и перемеще-