

© И. С. СЕРГЕЕВ, И. В. ЕГОРОВ

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ В МОРСКИХ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ (НА ПРИМЕРЕ БЕЛОМОРСКОГО ШЕЛЬФА)

Специфика геоморфологических исследований субаквального рельефа в первую очередь заключается в отсутствии возможностей прямого изучения объекта, как это проводится в сухопутных условиях. Достоверность и точность результатов зависят от разрешения сети донного опробования и наличия вспомогательных данных (таких, например, как геофизические исследования, подводные телевизионные наблюдения и т. д.). Резкое развитие в последние годы систем сбора, организации и анализа пространственных данных (геоинформационных систем — ГИС) позволило эффективно получать разноплановую информацию о строении подводного рельефа. В настоящей работе приводится пример использования ГИС для выполнения геоморфологического районирования беломорского шельфа. В качестве исходных данных использованы числовые данные батиметрии с навигационной карты [7] и листов топографических карт [11], всего около полутора тысяч значений. Для возможности проведения дальнейших графоаналитических построений была создана цифровая модель поверхности (ЦМП) с разрешением 1.5×1.5 км.

В математическом отношении выделение совокупностей форм рельефа земной поверхности, имеющих общее происхождение, основывается на статистических обобщениях. Каждая точка земной поверхности имеет фактическую высотную (глубинную) величину (z), которая есть следствие множества эндогенных и экзогенных рельефообразующих факторов (f). Примем, что факторы, влияющие на рельефообразование в водной среде в близко расположенных точках поверхности по вертикали, равны, т. е. $f_0 \approx f_{\pm 1} \approx \dots \approx \pm f_i$ тогда, когда $z_0 \approx z_{\pm 1} \approx \dots \approx z_{\pm i}$, а количество точек поверхности, отвечающих данному условию i , максимально (рис. 1). Тогда значения $z_1, z_2, \dots, z_i$ характеризуют субгоризонтальную поверхность морского шельфа. Рассмотрим морфологию рельефа выделенных поверхностей и их статистические признаки — это, возможно, позволит сделать вывод о происхождении субгоризонтальных поверхностей.

Практическое выделение субгоризонтальных поверхностей беломорского шельфа выполнено в приложении ArcGIS 9.1 инструментами, основанными на статистической обработке массива, представляющего модель исследуемой поверхности. Для этого рассмотрена гистограмма зависимости исходных числовых значений и частоты встречаемости данных значений в массиве (рис. 2).

На гистограмме можно увидеть частотные «всплески» для определенных интервалов глубин: $-8, -32, -52, -74, -96, -189, -278$ м. Соответственно вертикальными линиями отмечены границы числовых массивов, соответствующих субгоризонтальным поверхностям. Плановое расположение их показано на рис. 3.

Таким образом, выделены следующие батиметрические уровни.

1П, 0 — -23 м соответствует поверхности (площадь 35 тыс. км²), которая активно изменяется под воздействием современной приливной деятельности

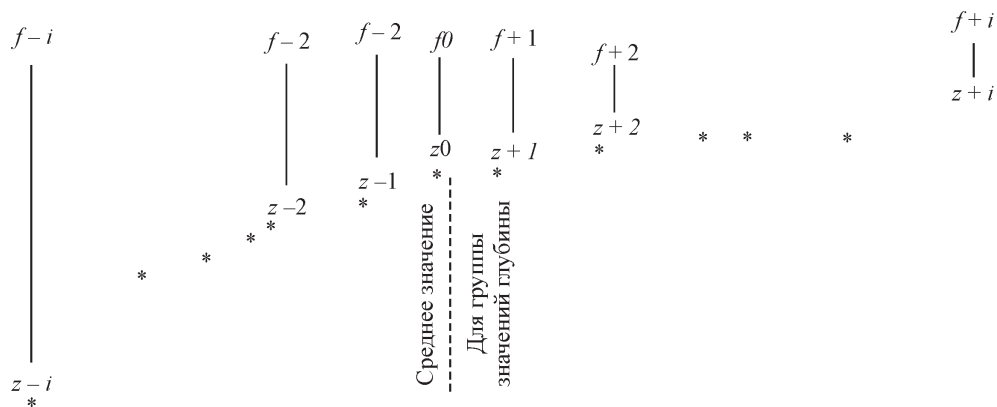


Рис. 1. Функциональные признаки высоты точек земной поверхности (z), рельефообразующих факторов (f) и их связи (цифровая модель поверхности и рисунки выполнены И. С. Сергеевым).

моря. Она формирует береговую линию Белого моря и современную сублитораль. В пределах рассматриваемой поверхности расположены Онежский и Мезенский заливы, а также восточная часть Воронки. Рельеф дна этих частей беломорского шельфа сформирован геоморфологическими процессами, присущими современной сублиторали беломорского шельфа.

2П, -23 — -39 м образует субгоризонтальную поверхность (площадь около 13 тыс. км²), имеющую значительную линейную протяженность и извилистость, что, возможно, указывает на наличие палеоэрозионной деятельности (рис. 3).

3П, -39 — -65 м. На данном уровне находится поверхность (площадь 13 тыс. км²), состоящая из следующих участков:

- Горло Белого моря — вытянутая в ЮЗ-СВ направлении плоская слабохолмистая равнина с опущенной центральной частью;
- СЗ часть Воронки Белого моря — субгоризонтальная поверхность, расширяющаяся в северном направлении;
- морские равнины: первая — часть Двинского залива, вторая — СЗ продолжение Онежского полуострова.

На этом батиметрическом уровне отмечаются относительно большие мощности голоценовых отложений — до 20 м [10], что характеризует эту поверхность как аккумулятивную.

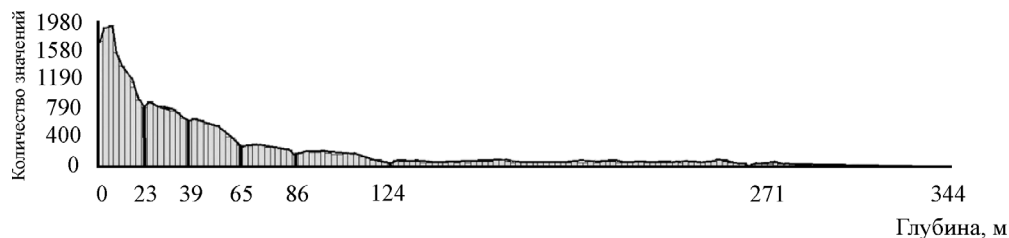


Рис. 2. Гистограмма частот для числового массива глубин дна Белого моря.

По горизонтальной оси — абсолютные отметки глубин, по вертикальной — частота встречаемости, величина, равная количеству точек поверхности для данного интервала глубины.

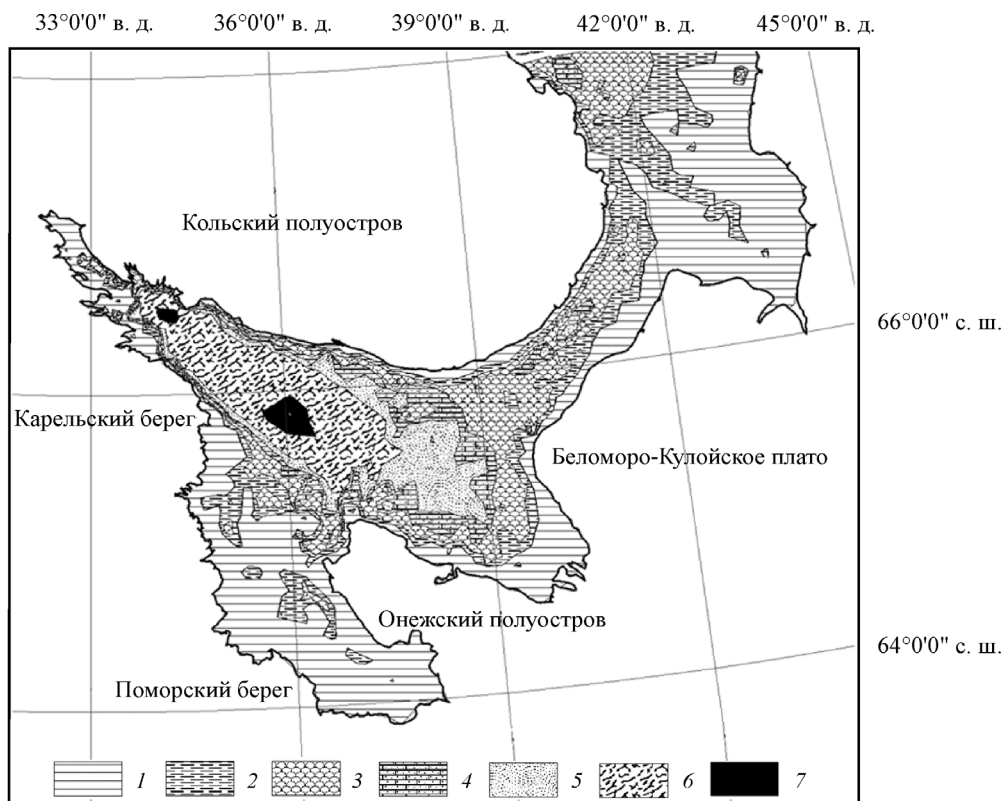


Рис. 3. Подводные субгоризонтальные поверхности Беломорского шельфа.

1 — 1П (0 — -23 м), 2 — 2П (-23 — -39 м), 3 — 3П (-39 — -65 м), 4 — 4П (-65 — -86 м), 5 — 5П (-86 — -124 м), 6 — 6П (-124 — -271 м), 7 — 7П (-271 — -344 м).

4П, -65—-86 м, субгоризонтальная поверхность (площадь 5.1 тыс. км²), как и поверхность 2П, имеет относительно небольшой поперечный размер, но большую продольную протяженность, очертания которой можно соотнести с контуром центральной впадины Белого моря.

5П, -86—-124 м. Эта поверхность (площадь около 5.6 тыс. км²) состоит из обширного аккумулятивного [1] донного плато в ЮВ части бассейна и окаймления центральной впадины, являющегося бортом этой впадины.

6П, -124—-271 м. Относительно большая вытянутая в СЗ-ЮВ направлении. В плане поверхность (площадь 8 тыс. км²) имеет клинообразную форму, значительную вертикальную расчлененность (перепад высот более 100 м). Сейсмоакустическими исследованиями бассейна Белого моря [3] отмечается блоковое строение этой поверхности, это подтверждается и характерной формой частотной гистограммы данного батиметрического уровня — отсутствием выраженного максимума распределения.

7П, -271—-344 м. На этой глубине находится поверхность, которая состоит из двух небольших участков (общая площадь 700 км²), по размеру и очертанию являющихся крупными тектоническими блоками, соотносящимися с центральной впадиной бассейна и впадиной Кандалашского залива. Данная поверхность характеризуется отложениями оползневых процессов,

зафиксированными на сейсмоакустических профилях [10]. На это указывает также распределение частот глубин — значительно растянутый «хвост» отрицательных значений — показатель критических углов наклона участков поверхности, приводящих к отрыву вещества.

Статистическое распределение значений площадей поверхностей показывает, что существовало два периода максимально интенсивного преобразования беломорского шельфа, соответствующих субгоризонтальным поверхностям — 3П и 6П, и один период в настоящее время — 1П.

Для выявления общих геометрических соотношений рассматриваемых поверхностей построим обобщенный профиль Беломорского шельфа, для этого вычислим значение усредненной ширины площадки профиля поверхности (b):

$$b = s / lcp,$$

где s — площадь поверхности, lcp — длина средней изобаты поверхности.

Тогда ширина соответствующих площадок b_i на обобщенном профиле равна (последовательно от 1П до 7П): 12.5, 5.5, 6.7, 4.3, 6.6, 19.2, 5.7 км (рис. 4).

Графическая схема субгоризонтальных поверхностей на рис. 4 и общий план на рис. 3 дают некоторое представление о генезисе рассматриваемых поверхностей дна Белого моря. Можно отметить корреляцию поверхностей 7П, 6П с беломорским грабеном [2]. Их происхождение, связанное с прогибанием земной коры, подтверждается относительно большим перепадом высот и площадей поверхностей (рис. 4). Левый сдвиг (асимметрия) статистического графика и растянутость правого «хвоста» этого распределения (рис. 2 — интервал $-274 \div -344$ м) являются характерными статистическими признаками наличия переуглубленных частей рельефа с критическими углами склонов.

Аккумулятивно-денудационные факторы сформировали поверхности 1П—4П, для них характерно малое вертикальное расчленение, но, как видно из плановых очертаний поверхностей (рис. 3), значительна горизонтальная расчлененность. Промежуточное положение между аккумулятивно-эрозионной террасой и тектонической поверхностью занимает поверхность 5П — это видно по нарастанию вертикального расчленения (высота площадки b_5) по сравнению с 1П—4П.

Таким образом, можно выделить пять субгоризонтальных поверхностей дна Белого моря аккумулятивно-денудационного происхождения. Некоторыми исследователями также отмечается наличие на определенных глубинах в Белом море подводных террас [4] или поверхностей размыва и террасовидных

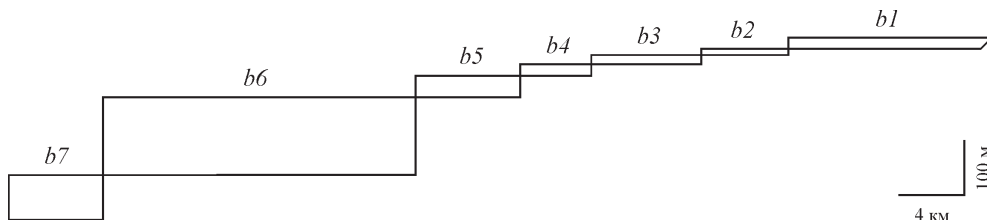


Рис. 4. Графическая схема обобщенного профиля субгоризонтальных поверхностей дна Белого моря на основании полученных данных о границах их расположения.

b_i — условная поперечная радиальная ширина поверхности, где i — номер поверхности на рис. 3.

уступов на глубинах 10—20 и 40—50 м [1]. Исходя из вышесказанного наиболее вероятно соотношение поверхностей 1П—4П с морскими террасами, образовавшимися вследствие регрессионно-трансгрессионных этапов беломорского региона и сопутствующим сублиторальным преобразованиям донного рельефа и береговой линии.

Определив такие характеристики земной поверхности, как вертикальная кривизна [5], при рассмотрении крупных площадных участков возможно получить информацию о деформациях в толще земной коры [8]. Тем более такая возможность обоснована для морского дна, так как для данных участков земной поверхности в меньшей степени проявляется воздействие денудационных факторов, приводящих, например, на суше к большему расчленению рельефа и появлению усложненного спектра (набора частот) числового массива, характеризующего поверхность.

Рисунок тектонических нарушений присутствует в рельефе земной поверхности. Выявление этого рисунка производится, например, по изображению рельефа на аэрофотоснимке [9]. Данная технология основывается на свойстве светового луча испытывать сильное рассеяние на элементах, имеющих большую кривизну, в отличие от плоско-наклонных поверхностей, дающих равномерную интенсивность отраженного светового потока. Растр вертикальной кривизны цифровой модели поверхности морского дна выявляет тектонические нарушения, проявленные в рельефе поверхности.

Вертикальная кривизна — это свойство земной поверхности, присущее выпуклым и вогнутым формам рельефа. «Геометрическое» определение вертикальной кривизны поверхности соответствует величине, на которую изменяется наклон поверхности на единицу длины, аналитически — это вторая производная функции высоты (глубины) поверхности. Учитывая это, на основе ЦМП беломорского шельфа получим растр вертикальной кривизны (рис. 5).

На рис. 5 видно, что преобладает поверхность слабodeформированная (белый цвет поверхности) с изменениями углов наклона поверхности на десятые доли градуса. Тогда как напряженные участки поверхности (черный цвет) сконцентрированы в определенных местах: Кандалакшский залив, подводная оконечность Онежского полуострова. Если рассмотреть статистические данные массива значений вертикальной кривизны, то окажется, что распределение имеет характерный вид нормального распределения, но смещено в сторону отрицательных значений изгиба поверхности, что говорит о преобладании прогибов поверхности и ее растяжении.

Наклон поверхности и всякое отличие ее от горизонтали приводят к возникновению потенциальных механических напряжений в толще земной коры. Поверхность при наличии напряжений деформации в толще земной коры меняет свою форму. Выпуклые участки указывают на горизонтальные относительные напряжения сжатия, присутствующие в земной коре, а вогнутый рельеф — на ослабление сжимающих усилий, т. е. растяжение. Если качественно описывать явление, то можно выделить два встречных процесса. Первый — разные уровни механических напряжений в толще земной коры вследствие эндогенных процессов приводят к возникновению градиента углов наклона поверхности. Второй процесс, экзогенный, действует в противоположном направлении — уменьшает углы наклона поверхности, например вследствие склоновых и аккумулятивных процессов, которые в течение длительного времени понижают градиент тектонических напряжений, проявленных на земной поверхности. Данные зависимости повсеместно наблюдаются

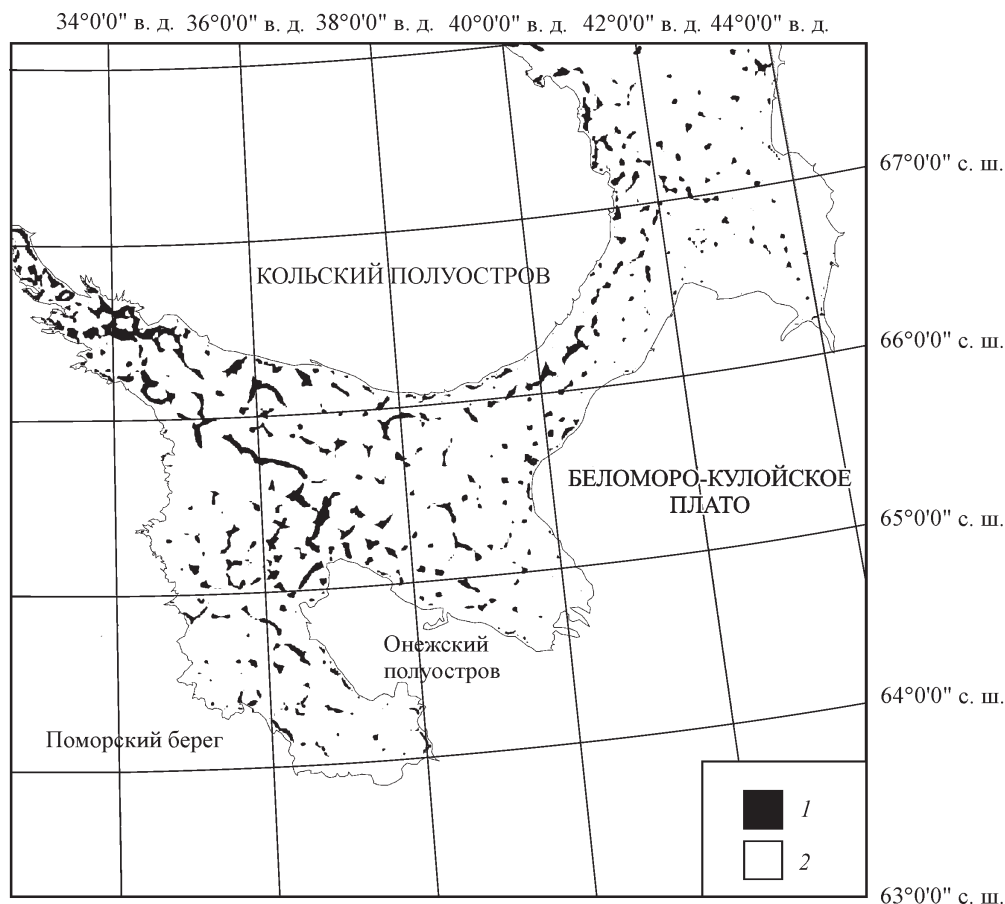


Рис. 5. Вертикальная кривизна поверхности морского дна Белого моря (1/км).

1 — 2—70, 2 — $\gg 70$.

в природе и в геоморфологии трактуются как составляющие литодинамического потока.

Для определения понятия интенсивности вертикальной кривизны и связи с тектоническими напряжениями поверхности представлен профиль (по данным ЦМП) морского дна Белого моря по линии от устья р. Варзуги (Кольский полуостров) до устья р. Летняя (Поморский берег Белого моря).

В нижней части рис. 6 (на соответствующем графике распределения кривизны вдоль профиля) знаками «+» и «-» показана качественная сторона явления деформации донной поверхности как границы раздела двух сред в гравитационном поле. На графике кривизны, соответствующему верхнему профилю, слева направо следуют попеременно положительные и отрицательные деформации поверхности. Если просуммировать площади подобных графиков вертикальной кривизны в пространстве географических координат, то получим растр интенсивности кривизны (рис. 7). На этом растре отображены границы участков тектонических напряжений в земной коре и их знаки.

На рис. 7 отчетливо просматриваются несколько разнородных участков земной коры, формирующих дно Белого моря. В бассейне Белого моря находится вытянутая с северо-запада на юго-восток зона растяжения (черный

ного профиля (б).

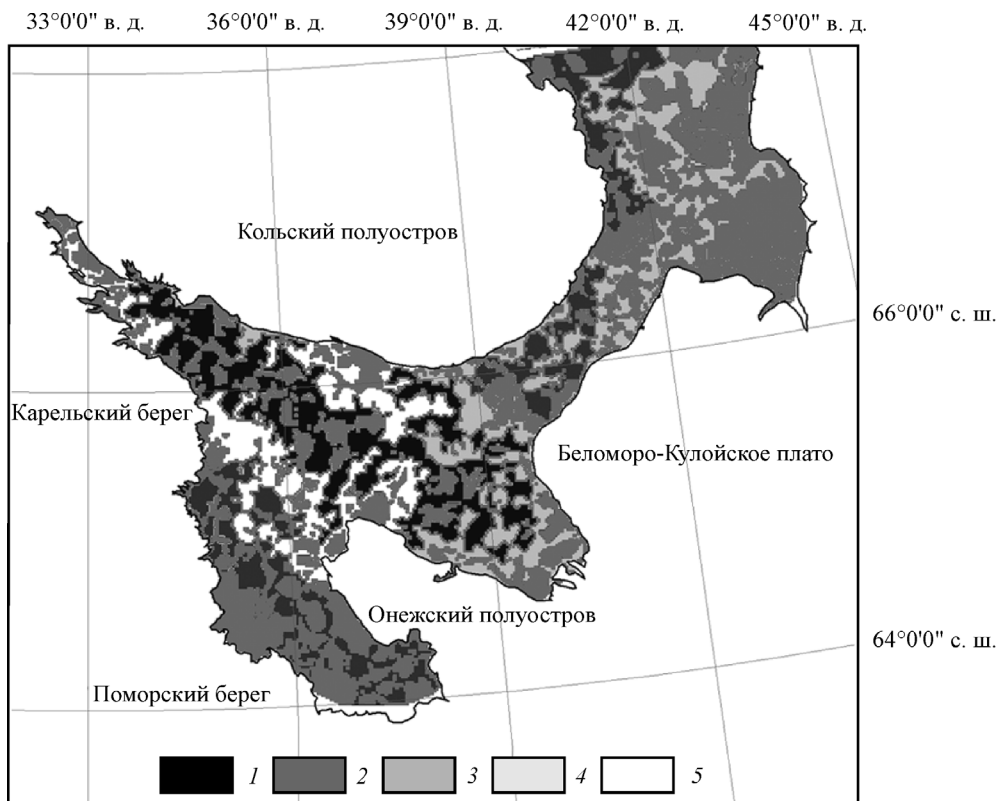


Рис. 7. Растр интенсивности вертикальной кривизны поверхности беломорского шельфа (м).
 1 — -1 782 399, 2 — -1 782 399 — -97 710, 3 — -97 710—61 484, 4 — 61 484—201 620, 5 — 201 620—437 835.

цвет), соответствующая беломорскому грабену [2]. Обрамляет ее зона сжатия земной коры — горстовые структуры (белый цвет мозаики), линейно вытянутые с СЗ на ЮВ и переходящие в берега Кандалакшского залива — Кольского полуострова и с ЮЗ стороны в Онежский полуостров. ЮЗ борт горстовой структуры граничит с тектоническим грабеном, формирующим Онежскую губу (темно-серый цвет). Центральный грабен, как отчетливо видно, продолжается в Двинской залив. Уменьшение интенсивности кривизны в Горле Белого моря указывает, что его формирует другая по интенсивности тектоническая структура. Это соответствует данным о меньшей тектонической активности дна в северо-восточной части Белого моря [2].

Северо-восточный участок Горла — Мезенский залив еще менее контрастно проявляется на растре интенсивности кривизны поверхности, что говорит о слабых тектонических возмущениях этой поверхности: современные процессы аккумуляции значительно скомпенсировали интенсивность вертикальной кривизны данного участка дна.

Показательным для растра является график частотной гистограммы распределения этого параметра (рис. 8). Совершенно отчетливо просматриваются пять «всплесков» частот: -1.76, -0.22, 0, 0.22, 0.44. Это значит, что имеются разные стадии деформации земной поверхности в пределах дна Белого

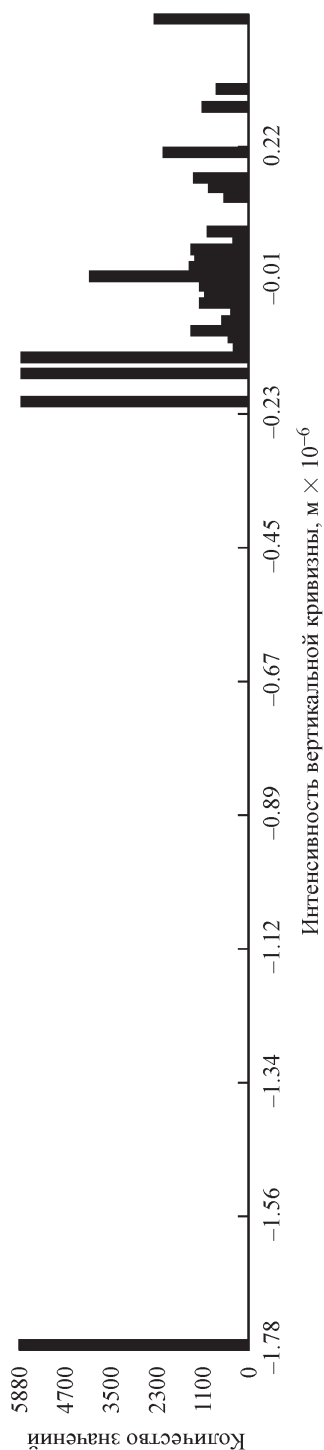


Рис. 8. Гистограмма частот значений интенсивности вертикальной кривизны поверхности беломорского шельфа.

моря. Числа, которые группируются вокруг значения 0, по виду образуют распределение, близкое к нормальному. Это означает, что присутствует некоторый основной фактор воздействия на кривизну форм рельефа, но его итоговое, суммарное значение сводится к нулю — отклонения от нулевого значения невелики. Этим фактором является аккумуляция. Нивелирующая роль аккумуляции ограничена для всей площади дна Белого моря, хотя локальные поля аккумулятивных форм рельефа встречаются почти повсеместно. Подводные аккумулятивные формы покрывают структурные поднятия дна или связаны с определенными теневыми зонами вблизи них [6]. Тектонические формы рельефа покрываются аккумулятивным слоем, приносимым речным стоком, поступающим в морской бассейн от волноприбойной деятельности и переносимым морскими течениями, а также материалом ледово-морского разноса вещества [12]. В целом характер распространения чехла четвертичных отложений в акватории Белого моря находится в зависимости от специфики донного рельефа и носит облекающий вид. Поэтому мозаичное (в центральном бассейне) и преобладающее расположение участков с околонулевым значением интенсивности вертикальной кривизны (в северо-восточных частях Горла Белого моря) определено многообразием аккумулятивных процессов Беломорского шельфа.

Совершенно иначе расположены тектонически напряженные участки земной поверхности, соответствующие крайним значениям гистограммы. Их расположение «тяготеет» к субгоризонтальным поверхностям П5, П6 и П7 (рис. 3), ранее они выделены как тектонические поверхности (поверхность П5 имеет признаки морской террасы, расчлененной тектоническими процессами), которые подвержены растягивающим усилиям в земной коре, вследствие чего происходит разрядка в виде частых, хотя и сравнительно слабых землетрясений, характерных в целом для всего Балтийского щита [4]. Происходит распадение всего щита на ряд отдельных с образованием тектонических грабенов и горстов, что в свою очередь мо-

жет служить причиной внезапных и резких изменений рельефа дна, очертаний береговой линии и т. п. Весьма подробные исторические свидетельства о землетрясениях в районе Белого моря и изменениях глубин бассейна приводит В. В. Кузнецов [4]. Там же приводятся факты о некоторых теплолюбивых видах морских животных, существовавших в прошлом в центральной впадине Белого моря. Сейчас такое существование невозможно, так как температуры на дне котловины круглый год отрицательны. Данное изменение условий связывается с тектоническим опусканием дна. Таким образом, формы рельефа, имеющие ту или иную интенсивность вертикальной кривизны, могут в разной степени нивелироваться морскими четвертичными отложениями, но генерализированный плановый рисунок интенсивности вертикальной кривизны поверхности шельфа в большей или меньшей степени соответствует неотектоническим процессам в земной коре.

Подводя итоги, можно сказать, что намечены некоторые возможные пути решения проблемы геоморфологического районирования морского шельфа. Проведенный анализ статистического распределения высотных значений точек земной поверхности показал, что каждый выделенный максимум частотной гистограммы (рис. 2) соответствует преобладающему значению батиметрических значений крупного, почти горизонтального участка земной поверхности, осложненного более мелкими формами рельефа. Плановые границы субгоризонтальных поверхностей соответствуют низким частотам батиметрического распределения (рис. 3), они связаны с относительно небольшими по площади переходными частями поверхности шельфа (уступами) с повышенными значениями углов наклона поверхности. Геоморфологические свойства выделенных субгоризонтальных поверхностей закономерно изменяются в зависимости от батиметрического уровня, что позволило выделить по крайней мере шесть морских подводных террас (четыре древних уровня стояния моря) и две поверхности, расположенные в самых глубоких частях беломорского шельфа с преобладающим рельефом тектонического происхождения. Рассмотрены свойства второй производной функции донной поверхности, позволяющей дополнить геоморфологическую характеристику беломорского шельфа выделением участков, испытывающих неотектонические движения.

Таким образом, использование ГИС в геоморфологии обоснованно и применимо как для широких геоморфологических обобщений, так и детальных исследований рельефа для решения прикладных задач.

Список литературы

- [1] Алявдин Ф. А., Мануйлов С. Ф., Рыбалко А. Е., Спиридонов М. А., Спиридонова Е. А., Эйхгорн Г. Л. Новые данные по геологии северо-западной части Белого моря // *Природа и хозяйство Севера*. 1977. Вып. 6. С. 30—38.
- [2] Амантов А. В. Геологическое строение осадочного чехла бассейнов Северо-Запада России // *Осадочный покров гляциального шельфа северо-западных морей России*. СПб., 1992. С. 25—47.
- [3] Журавлев В. А., Шлыкова В. В. Тектоника беломорского региона в свете новых геофизических данных. Мурманск, 2004 (<http://gendocs.ru/v34039/?download=44>).
- [4] Кузнецов В. В. Белое море и биологические особенности его флоры и фауны. Изд-во Академии наук СССР. 1960. 323 с.

- [5] Ласточкин А. Н. Общая геоморфология. СПб., 1991.
- [6] Мануйлов С. Ф., Рыбалко А. Е., Спиридонова Е. А., Спиридонов М. А. Четвертичная геология северо-западной части Белого моря // Стратиграфия и палеогеография четвертичного периода севера европейской части СССР. Петрозаводск, 1977. С. 47—54.
- [7] Навигационная карта Белого моря. Главное Управление навигации и океанографии МО СССР, 1984.
- [8] Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии / Под ред. А. Ф. Грачева. М., 2000.
- [9] Петрусеви́ч М. Н. Аэрометоды при геологических исследованиях. М., 1962.
- [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] Топографические карты масштаба 1: 500 000, листы: Q-36, Q-37, Q-38. 1986—1987.
- [12] Чувардинский В. Г. К вопросу о материковом оледенении Фенноскандии // Изв. РГО. 2010. Т. 142, вып. 5. С. 32—37.

Санкт-Петербург
igorsergeev.spb@gmail.com
ieg@mail.ru

Поступило в редакцию
25 февраля 2014 г.

Санкт-Петербургский государственный университет

Изв. РГО. 2014. Т. 146. Вып. 5

© В. Н. ШАВРИН

О МЕСТЕ СУБЦЕНТРОВ В РАЙОННЫХ СИСТЕМАХ РАССЕЛЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ТВЕРСКОЙ ОБЛАСТИ)

Введенный в 2004 г. новый Градостроительный кодекс обязал субъекты РФ и муниципальные районы разрабатывать схемы территориального планирования (СТП), которые должны регламентировать пространственное развитие соответствующих территорий. Оно немыслимо без учета особенностей расселения — ключевого фактора пространственного развития. Интересно, что в кодексе термин «расселение» не упоминается, в отличие от советской районной планировки, где он был широко распространен. Тем не менее это не мешает разработчикам СТП использовать его и анализировать само явление.

При рассмотрении систем расселения особое место отводится выделению опорных центров разного уровня, что характеризует иерархичность систем. Эти центры контролируют свой хинтерланд и в зависимости от уровня иерархии обеспечивают жителей подконтрольных территорий услугами повседневного, периодического или эпизодического спроса. В рассматриваемых нами районных системах расселения (РСР), представляющих собой всю совокупность населенных пунктов, скрепленных между собой «людскими» связями,