Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 226-234

Морфометрический анализ рельефа острова Вайгач по данным дистанционного зондирования Земли

Е.В. Полякова[1,2], М.Ю. Гофаров[1,2]

[1]Институт экологических проблем Севера УрО РАН, Архангельск 163000, Россия
E-mail: lenpo26@yandex.ru
[2]Центр космического мониторинга Арктики Северного (Арктического) Федерального Университета, Архангельск 163000, Россия
E-mail: zubr3@yandex.ru

Морфометрический анализ рельефа является одним из самых эффективных методов его исследования. Основными источниками информации при цифровом моделировании рельефа являются крупномасштабные топографические карты, материалы полевых инструментальных съёмок, а также данные дистанционного зондирования Земли. Применение ГИС-технологий и цифровых моделей рельефа дает возможность создавать тематические карты важнейших морфометрических показателей рельефа. В данной статье проведен морфометрический анализ рельефа острова Вайгач с использованием цифровой модели рельефа ASTER GDEM 2 (NASA, METI), на основании которой были построены производные модели: гипсометрическая карта, карты углов наклона дневной поверхности и экспозиции склонов. Согласно данным моделям средняя высота рельефа острова составляет 45 м, большая часть склонов острова характеризуются как пологие северной экспозиции. Кроме того, по методике Wood J.D. определены морфометрические параметры рельефа. Выделено 6 типов поверхностей: плоские поверхности (Planar), впадины (Pit), каналы (Channel), проходы (перевалы) (Pass (saddle)), хребты (Ridge), пики (Peak). По морфометрическим показателям основными типами поверхностей острова являются каналы (Channel) и хребты (Ridge), что на местности соответствует рекам и их бортам.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, цифровая модель рельефа, морфометрический анализ, типы поверхностей.

Введение

Одним из наиболее эффективных методов при анализе вклада рельефа в функционирование геосистем является морфометрический анализ. Именно этот метод широко используется в геоморфологии при проведении исследований как в нашей стране, так и за рубежом. Причем в последнее время сфера применения морфометрического анализа значительно расширилась, выйдя за рамки чисто геоморфологических работ, в частности, он применяется для решения некоторых геоэкологических задач, при проведении изысканий для проектирования и строительства в различных областях и т.д. (Глейзер и др., 2006).

Основными источниками информации при цифровом моделировании рельефа являются крупномасштабные топографические карты, материалы полевых инструментальных съёмок, а также данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Каждый из источников данных имеет свои достоинства и недостатки, но в целом следует отметить тенденцию роста роли данных ДЗЗ в анализе рельефа той или иной территории. Применение ГИС-технологий и данных ДЗЗ позволяет существенно упростить не только получение количественных данных по рельефу, но и провести по ним моделирование. Во многих известных на сегодняшний день ГИС программных продуктах существуют методики построения цифровых моделей рельефа (ЦМР), кроме того разработаны глобальные ЦМР, такие как ASTER

GDEM и SRTM, находящиеся в свободном доступе в сети Интернет. С использованием ЦМР, в свою очередь, возможно быстрое создание серии тематических карт важнейших морфометрических показателей: гипсометрической карты, карт крутизны и экспозиций склонов, а на их основе карт эрозионной опасности, направлений поверхностного стока, геохимической миграции элементов, устойчивости ландшафтов и т.п. (Хромых и др., 2007).

В июле-августе 2010 г. коллективом Института экологических проблем Севера УрО РАН была проведена Северная комплексная экспедиция на о. Вайгач. Работы осуществлялись в наиболее труднодоступной северной части острова в районе озер Талатинское и Янгото (*рис. 1*). Помимо многочисленных работ, выполняемых специалистами различных научных направлений, одной из задач исследований являлось определение преобладающих форм рельефа острова.

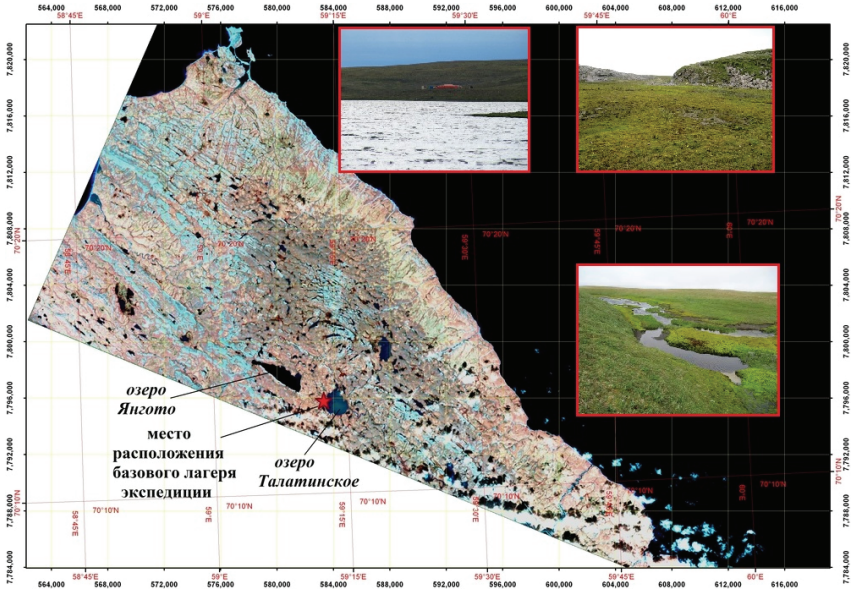


Рис. 1. Расположение базового лагеря Северной комплексной экспедиции ИЭПС УрО РАН (сцена Terra ASTER, дата 2010-07-07, время 08:22:20)

Характеристика района исследования

О. Вайгач располагается между холодным Карским морем на востоке и относительно более тёплым Баренцевым на западе, отделен с юга от континента (Югорского полуострова) узким проливом Югорский Шар и с севера от архипелага Новая Земля проливом Карские Ворота. Координаты центральной точки острова – 70°01′00″ с. ш. 59°33′00″ в. д. Административно принадлежит Ненецкому автономному округу. Площадь – 3400 км^2. На территории острова Администрацией НАО № 111-п от 29 мая 2007 г. учрежден Государственный региональный комплексный природный заказник «Вайгач».

Согласно геоботаническому районированию о. Вайгач расположен в тундровой области, его большая северная часть относится к подобласти арктических тундр, южная оконеч-

ность – к подобласти гипоарктических (субарктических) тундр. В климатическом отношении граница арктических тундр примерно совпадает с изотермой июля +6° С. Климат острова морской арктический. В течение всего года на острове, по средним данным метеостанций (Вайгач, Бухта Варнека и Болванский нос), отмечается неустойчивая погода с преобладанием пасмурных дней – число дней с общей облачностью составляет 156, с нижней – 84.

Структурно остров Вайгач входит в Южный мегаблок архипелага Новая Земля. Орографически о. Вайгач (и архипелаг Новая Земля) являются продолжением Уральских гор (Устрицкий и др., 2009). В геологическом плане сложен дислоцированным комплексом верхне-протерозойских-палеозойских пород, перекрытым маломощным, до 20 м, мозаичным покровом рыхлых четвертичных отложений. И сам остров, и часть прилегающей акватории расположены в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород, мощностью до 400 м. Рельеф острова изменяется от прибрежно-морского равнинного до расчлененного, в виде двух параллельно протянувшихся вдоль центральной части острова гряд высотой до 100-150 м. Преобладающие породы – сланцы, песчаники и известняки. Растительность тундровая. Много термокарстовых, ледниковых и тектонических озёр и болот (Корейша, 2000).

Материалы и методика работ

Для проведения морфометрического анализа рельефа острова была использована ЦМР ASTER GDEM 2 (NASA, METI). ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) – усовершенствованный спутниковый радиометр теплового излучения и отражения, установленный на борту спутника NASA Terra и запущенный в декабре 1999 года. Продукт ASTER GDEM (Global Digital Elevation Model) разработан совместно METI (Ministry of Economy, Trade, and Industry) и NASA (National Aeronautics and Space Administration). Сенсор ASTER имеет возможность стереоскопической съемки вдоль полосы пролета с помощью двух телескопов, снимающих в надир и назад в ближнем инфракрасном диапазоне с отношением база-высота (base-to-height ratio) – 0,6. Пространственное разрешение в плане – 15 метров. Одна сцена ASTER в видимом или ближнем инфракрасном диапазоне имеет размер 4100 на 4200 элементов, что соответствует 60х60 км на поверхности Земли (ASTER Global DEM…, 2009).

Исходная модель имеет ряд аномальных значений, которые устранялись согласно (Reuter et al., 2007). Артефактам присваивалось значение null, затем строились контуры с шагом 10 м, и проводилась интерполяция значений null с использованием алгоритма TOPOGRID в программном продукте ESRI ArcGIS 10. На основании ЦМР были построены тематические картосхемы важнейших морфометрических показателей: гипсометрическая

картосхема, модели углов наклона дневной поверхности и экспозиции склонов. Данные модели построены в ESRI ArcGIS 10 с использованием пакетов инструментов Surface. При создании легенд картосхем использовались традиционные общепринятые цветовые гаммы: для гипсометрической – от темно-зеленых тонов к коричневым, для углов наклона дневной поверхности – оттенки одного цвета, при этом, согласно принятым в картографии правилам, чем больше картографируемый показатель, тем темнее цвет (в нашем случае от светло- до темно-желтого). Легенда к карте экспозиций склонов создавалась путём классификации значений на 8 румбов по 45° каждый и на плоские участки без выраженной экспозиции (угол менее 0,1°). Цвет подбирался автоматически, соседние румбы имеют близкие оттенки цветовой гаммы (Хромых и др., 2007). Далее нами выделены и охарактеризованы морфометрические параметры рельефа по методике Дж. Вуда (Wood J.D.) (Wood, 1996). Согласно данной методике вся поверхность анализируется по таким морфометрическим характеристикам как угол склона и различные разновидности кривизны (поперечная и продольная, их максимальные и минимальные значения), затем классифицируются в 6 морфометрических типов: 1 – плоские поверхности (Planar), 2 – впадины (Pit), 3 – каналы (Channel), 4 – проходы (перевалы) (Pass (saddle)), 5 – хребты (Ridge), 6 – пики (Peak). Морфометрический анализ проводился в некоммерческом программном продукте GRASS GIS 6.4.3. с применением модуля r.param.scale. Для всех производных от ЦМР моделей произведена статистическая обработка данных в программном продукте Microsoft Excel 2010.

Результаты работ и обсуждения

Анализ производных от ЦМР моделей (гипсометрической, углов наклона дневной поверхности и экспозиции склонов) показал следующее. Средняя высота рельефа острова (*рис. 2А*) составляет 45 м, максимальная – 157 м (гора Болванская), в целом перепад высот крайне незначительный. Углы наклона дневной поверхности варьируют от 0 до 30 градусов, для наглядности на *рис. 2Б* показаны углы наклона от 1 до 15°. Среднее значение угла наклона дневной поверхности составляет 5,44 градуса. В *табл. 1* приведено процентное соотношение склонов по их крутизне.

Таблица 1. Количество склонов определенной крутизны на о. Вайгач

Угол наклона, град.	***Количество, %***
0-2	21,4
2-4	30,8
4-8	27,1
8-15	16,9
15-30	3,8

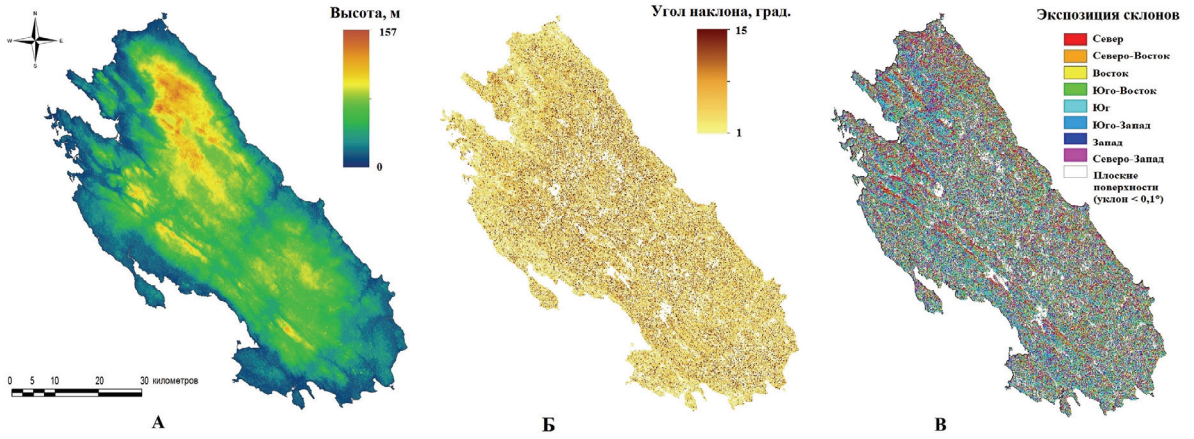


Рис. 2. Производные от ЦМР модели:
А – гипсометрическая, Б – углов наклона дневной поверхности, В – экспозиции склонов

Согласно классификации Н.И. Николаева все склоны делят на: очень крутые (>35°), крутые (15-35°), склоны средней крутизны (8-15°), пологие (4-8°), очень пологие (2-4°). При углах наклона менее 2° поверхности не относятся к склонам (Рычагов, 2006). Из *табл. 1* следует, что порядка 58 % всех склонов о. Вайгач – это склоны пологие и средней крутизны, около 31 % – очень пологие, 21 % – плоские поверхности (сюда относятся как участки суши с углом наклона менее 2°, так и водные поверхности). Только около 4 % склонов острова можно охарактеризовать как крутые.

На модели экспозиции склонов (*рис. 2В*) цветом хорошо выделяется северная ориентация склоновых поверхностей. В *табл. 2* приведено процентное соотношение для 8 румбов экспозиции склонов.

Таблица 2. Количество склонов определенной экспозиции на о. Вайгач

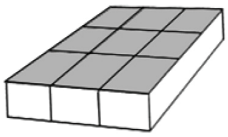
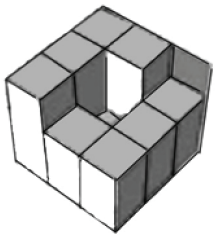
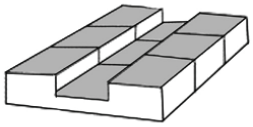
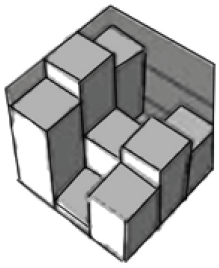
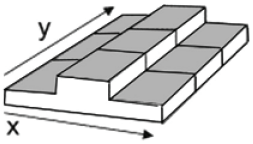
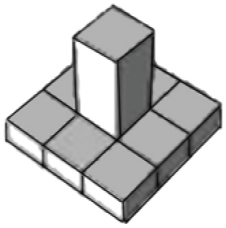
Экспозиция (румб, град.)	***Количество, %***
Плоские поверхности (уклон < 0,1°)	14
Север (337,5-22,5°)	20
Северо-Восток (22,5-67,5°)	10
Восток (67,5-112,5°)	5
Юго-Восток (112,5-157,5°)	8
Юг (157,5-202,5°)	20
Юго-Запад (202,5-247,5°)	10
Запад (247,5-292,5°)	5
Северо-Запад (292,5-337,5°)	8

Из *табл. 2* следует, что преобладают склоны северной (20 %) и северо-восточной (10 %) экспозиции. К плоским поверхностям, составляющим 14 % территории, относятся участки суши с углом наклона менее 0,1° и все водные поверхности острова.

Морфометрический анализ рельефа острова по методике Дж. Вуда (Wood J.D.) предполагает разделение поверхности на 6 морфометрических классов (*рис. 3*). Статисти-

ческий анализ (*табл. 3*) позволяет определить, что преобладающими типами поверхностей для о. Вайгач, согласно данной методике, являются каналы (порядка 30 %) и хребты (около 35 %), что на местности соответствует рекам и их бортам. Также достаточное количество плоских поверхностей (21 %), в основном это водные объекты (озера).

Таблица 3. Количество морфометрических классов рельефа на о. Вайгач

Номер класса	***Название класса***	***Схематическое изображение***	***Количество, %***
1	Плоские поверхности (Planar)		21,2
2	Впадины (Pit)		2,2
3	Каналы (Channel)		28,8
4	Проходы (перевалы) (Pass (saddle))		9,4
5	Хребты (Ridge)		35,6
6	Пики (Peak)		2,8

Согласно (Вехов, 2000), речные долины восточного берега обычно имеют каньонообразный или ущельный облик. В долинах западных румбов каньонообразные долины характерны для участков, перехода структурно-денудационной приподнятой грядовой равнины к абразионной и абразионно-аккумулятивной равнине. И для всех рек такой характер долин типичен на участках структурных и неотектонических ступеней, выраженных на бортах и водоразделах рек.

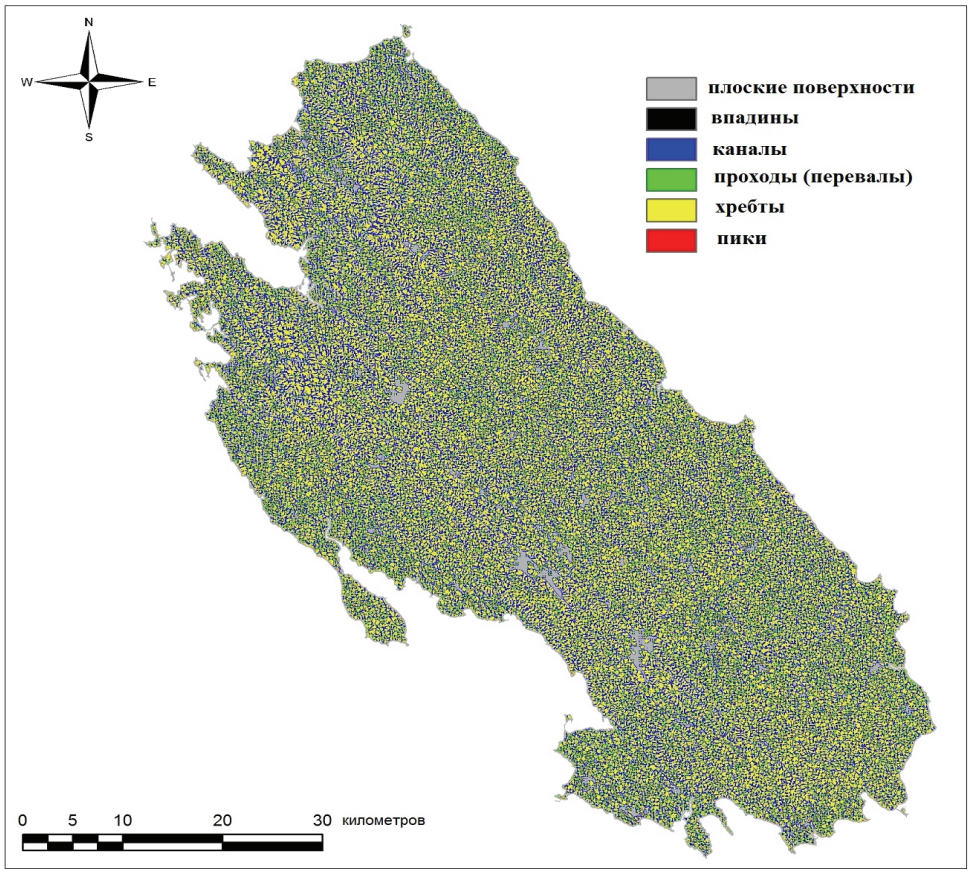


Рис. 3. Морфометрические характеристики рельефа

Выводы

В геоморфологическом отношении остров Вайгач является, в основном, приподнятой (возвышенной) структурно-денудационной грядовой, волнисто-грядовой, холмисто-западинной аккумулятивной равниной, в меньшей степени – абразионной и абразионно-аккумулятивной террасированной морской равниной с отдельными аккумулятивными формами. Облик рельефа острова сформирован на новейшем этапе геологического развития за счет экзогенных рельефообразующих процессов с преобладанием денудационных процессов над аккумулятивными (Каленич и др., 2004). Практически для всех водотоков острова характерен невыработанный продольный профиль, с многочисленными ступенями, водопадами, подтопленными или подвешенными устьями, что говорит об их относительной молодости, сложности геологического и геоморфологического строения острова Вайгач (Вехов, 2000).

В результате проведенного анализа ЦМР обозначена средняя высота рельефа порядка 45 м, большая часть склонов характеризуется как пологие северной экспозиции. По морфометрическим показателям основными типами поверхностей острова являются каналы и хребты, что соответствует рекам и их бортам.

В получении информации о рельефе той или иной территории данные ДЗЗ являются эффективным и оперативным инструментом. В сочетании с ГИС-технологиями их

применение дает возможность проведения моделирования, а также значительно ускоряет процесс проведения анализа основных морфометрических показателей рельефа, что особенно актуально для малоизученных и труднодоступных территорий.

Литература

1. *Глейзер И.В., Копанева И.М., Рублева Е.А.* Некоторые аспекты использования ГИС-технологий при морфометрическом анализе рельефа // Вестник Удмуртского университета, 2006. № 11. С. 143–146.
2. *Хромых В.В., Хромых О.В.* Цифровые модели рельефа: Учебное пособие. Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. 178 с.
3. *Устрицкий В.И., Повышева Л.Г.* Что такое Новая Земля? // Геология полярных областей Земли. Материалы 42 Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2009. Том 2. С. 257–260.
4. *Корейша М.М.* Вечная мерзлота острова Вайгач // Электронный журнал «Journal of Geocryology». Vol. 2. 2000. URL: http://www.netpilot.ca/geocryology/number2/koreisha2.html
5. *Reuter H.I., A. Nelson, A. Jarvis.* An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data // International Journal of Geographic Information Science. 2007. Vol. 21(9). P. 983–1008.
6. *Wood J.D.* The Geomorphological Characterization of Digital Elevation Models // Department of Geography. Leicester: University of Leicester, UK, 1996.
7. *Рычагов Г.И.* Общая геоморфология. М.: Наука, 2006. 416 с.
8. *Вехов Н.В.* Озера и реки острова Вайгач // География и природные ресурсы. 2000. № 6. С. 67–74.
9. *Каленич А.П., Орго В.В., Соболев Н.Н., Бондарев В.И., Семенов Ю.П., Мусатов Е.Е.* Новая Земля и остров Вайгач: Геологическое строение и минерагения. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2004. 174 с.

Morphometric relief analysis of Vaygach Island from Earth remote sensing data

E.V. Polyakova[1,2], M.J. Gofarov[1,2]

[1]Institute of Ecological Problems of the North UD RAS, Arkhangelsk 163000, Russia
E-mail: lenpo26@yandex.ru
[2]Space Monitoring Center of the Arctic of the Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk 163000, Russia
E-mail: zubr3@yandex.ru

Morphometric analysis of a relief is one of the most effective methods of its study. The main sources of information in a digital elevation modeling are large-scale topographic maps, instrumental field shooting and remote sensing data. Application of GIS technology and digital elevation models allows to create thematic maps of the most important morphometric parameters of a relief. This article describes morphometric analysis of the relief of Vaygach Island using the global digital elevation model ASTER GDEM 2 (NASA, METI) and derived models: hypsometric map, maps of the slope angles and slope aspects. According to these models the average height of elevations of the island is 45 m, most of the slopes are characterized as gentle slopes of the northern aspect. Also, based on the Wood J.D. method, morphometric parameters of the elevations were determined. Six types of surfaces were defined: Planar, Pit, Channel, Pass (saddle), Ridge, Peak. The main types of the surface on the island are channels and ridges associated with local rivers and river banks.

Keywords: remote sensing of Earth, digital elevation model, morphometric analysis, types of surfaces.

References:

1. Gleizer I.V., Kopaneva I.M., Rubleva E.A., Nekotorye aspekty ispol'zovaniya GIS-tekhnologii pri morfometricheskom analize rel'efa (Some aspects of the use of GIS technology in the morphometric analysis of relief), *Vestnik Udmurtskogo universiteta*, 2006. No 11, pp. 143–146
2. Khromykh V.V., Khromykh O.V. *Tsifrovye modeli rel'efa* (Digital elevation models), Tomsk: TML-Press, 2007, 178 p.

3. Ustritskii V.I., Povysheva L.G. Chto takoe Novaya Zemlya? (What is the Novaya Zemlya?), *42 Tektonicheskoe soveshchanie "Geologiya polyarnykh oblastei Zemli"* (42th Tectonic meeting. Geology of the polar regions of the Earth), Moscow: GEOS, 2009, Vol. 2, pp. 257–260.
4. Koreisha M.M., available at: http://www.netpilot.ca/geocryology/number2/koreisha2.html
5. Reuter H.I, A. Nelson, A. Jarvis, An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data, *International Journal of Geographic Information Science*, 2007, Vol. 21(9), pp. 983–1008.
6. Wood J.D. *The Geomorphological Characterization of Digital Elevation Models*, Leicester: University of Leicester, UK, 1996.
7. Rychagov G.I., *Obshchaya geomorfologiya* (General geomorphology), Moscow: Nauka, 2006, 416 p.
8. Vekhov N.V., Ozera i reki ostrova Vaigach (Lakes and rivers of Vaygach Island), *Geografiya i prirodnye resursy*, No. 6, 2000, pp. 67–74.
9. Kalenich A.P., Orgo V.V., Sobolev N.N., Bondarev V.I., Semenov Yu.P., Musatov E.E., *Novaya Zemlya i ostrov Vaigach: Geologicheskoe stroenie i minerageniya* (Novaya Zemlya and Vaygach Island: Geological structure and metallogeny), Saint-Petersburg.: VNIIOkeangeologiya, 2004, 174 p.