

РАЗДЕЛ V
МАТЕМАТИКА. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ
[MATHEMATICS. MATHEMATICAL MODELING]

УДК: 528:351.4; 551.435.1

DOI: 10.24412/2658-4441-2023-2-68-74

С.А. ЧУПИКОВА, А.Ф. ЧУЛЬДУМ

Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН (Кызыл, Россия)

**МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЛЬЕФА
ВОСТОЧНО-ТУВИНСКОГО ЛАВОВОГО НАГОРЬЯ
(РЕСПУБЛИКА ТУВА) ПО ДАННЫМ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

В статье рассмотрены результаты морфометрического анализа рельефа Восточно-Тувинского лавового нагорья, выполненного в облачной программной платформе геопространственных данных Google Earth Engine (GEE). На основе цифровой модели рельефа построены производные модели: карты углов наклона дневной поверхности, экспозиции склонов и гипсометрическая карта. Выполнен анализ гипсометрии (гипсографические кривые) отдельных водосборов. Согласно данным моделям средняя высота рельефа исследуемого участка составляет 1750 м, большая часть склонов исследуемой территории характеризуются как пологие северной экспозиции.

Ключевые слова: Восточно-Тувинское нагорье, экспозиция и уклоны склонов, гипсографическая кривая.

Рис. 4. Библ. 11. назв. С. 68–74.

Работа выполнена по государственному заданию ТувИКОПП СО РАН:

Научная тема № 121031300230-2

S.A. CHUPIKOVA, A.F. CHULDUM

Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources of SB RAS (Kyzyl, Russia)

**MORPHOMETRIC ANALYSIS OF THE RELIEF OF THE EAST TUVA
LAVA HIGHLANDS (REPUBLIC OF TYVA) ACCORDING TO REMOTE
SENSING DATA**

The article considers the results of morphometric analysis of the relief of the East Tuva lava Highlands, performed in the Google Earth Engine (GEE) cloud geospatial data software platform. Derived models are constructed based on the digital relief model: maps for the angles of inclination of the daytime surface, slope exposures and a hypsometric map. The analysis of hypsometry (hypsographic curves) of individual water accumulations was carried out. The average elevation of the studied area is 1,750 m according to the mentioned models, and most of the slopes of the studied area are characterized as gentle northern exposures.

Keywords: East Tuva highlands, exposure and slopes inclinations, hypsographic curve.

Figures 4. References 11. P. 68–74.

ВВЕДЕНИЕ. В настоящее время морфометрический анализ является одним из наиболее результативных методов исследования рельефа. При цифровом моделировании рельефа используются различные источники информации, включая крупномасштабные топографические карты, материалы полевых инструментальных съёмок и данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Каждый из этих источников имеет свои преимущества и недостатки. Однако следует отметить, что данные ДЗЗ играют всё более значимую роль в анализе рельефа территории. Применение геоинформационных систем в сочетании с цифровыми моделями рельефа (ЦМР) значительно упрощает процесс получения количественных данных о рельефе, моделирования и составления частных тематических карт. Существует огромное количество подходов для создания ЦМР в известных геоинформационных программах, а также доступны глобальные ЦМР, такие как ASTER 226GDEM и SRTM, которые можно найти в открытом доступе в Интернете.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — выполнить морфометрический анализ Восточно-Тувинского лавового нагорья на базе снимков каталога LANDSAT платформы Google Earth Engine (GEE). Для этого проведём гипсометрический анализ частных водосборных бассейнов, фрактальный анализ речной сети, а также расчёт и картографирование основных морфометрических показателей (уклоны и экспозиция склонов).

Для обработки и анализа материалов применены дистанционные методы, фрактальный и статистический анализ.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ. Восточно-Тувинское лавовое нагорье — одно из крупнейших лавовых районов новейшего времени в Центральной Азии (Сугоракова и др., 2003). Расположенное севернее хр. Акад. Обручева, данное место характеризуется сложным блоковым строением, выражающимся в рельефе многочисленными среднегорными хребтами высотой до 2600 м и впадинами с маломощным покровом четвертичных отложений. Более крупная из них — Тоджинская, имеет отметки 740–840 м и характеризуется чередованием озёрных котловин, обработанных древними ледниками, и невысоких водораздельных гряд со следами оледенения. Понижения рельефа представлены моренными, флювиогляциальными, зандровыми и аллювиальными равнинами. Небольшие впадины, такие как Сейбинская, Сыстыгхемская и Серлигхемская, были образованы в результате воздействия ледников в период плейстоцена. В то же время, резкое увеличение вулканической активности в Южно-Байкальской вулканической области привело к формированию Восточно-Тувинского лавового нагорья и множества лавовых рек, которые расположены в бассейнах рек Большой и Малый Енисей и Джиды. Этот процесс начался около 3 млн лет назад. Исследуемая территория расположена в пределах от 52°00′ до 52°40′ северной широты и 97°40′ до 98°40′ восточной долготы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА РАБОТ. Проведение морфометрического анализа рельефа территории исследования выполнено в программной среде платформы Google Earth Engine (GEE) (The geospatial...: эл. ресурс). Для этой цели на языке *javascript*, платформы GEE написан скрипт для расчётов и визуализации результатов. В формате растровых данных высот изучаемой местности использовался набор данных NASA/NASADEM_HGT/001, из каталога GEE (NASA EOSDIS...: эл. ресурс). NASADEM является модернизацией цифровой модели рельефа (DEM) и связанных с ней продуктов, созданных на основе данных миссии Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Базы данных NASADEM имеются в свободном доступе и представляют собой улучшенную цифровую модель рельефа (ЦМР), созданную на основе данных SRTM, ASTER, GDEM, ICESat GLAS, PRISM с использованием улучшенных алгоритмов (Landsat Missions...: эл. ресурс). Пространственное разрешение в плане 30 м. С применением ЦМР были разработаны карты, демонстрирующие важные морфометрические параметры. Среди них — гипсометрическая карта (рис. 1), модели экспозиции склонов (рис. 2) и углов наклона дневной поверхности (рис. 3). Все изображения и карты, включая вычисленные значения уклона и экспозиции, были созданы с

помощью программной среды Google Earth Engine (GEE). Для получения карты уклона (крутизны склона) и экспозиции склона использовались встроенные функции Terrain.slope и Terrain.aspect. Для карт, отображающих рельеф, были применены стандартные расцветки, начиная от зелёных оттенков и заканчивая тёмно-коричневыми цветами. Для демонстрации углов наклона поверхности были применены различные оттенки одной тонировки. Согласно В.В. и О.В. Хромых (2007), был выбран подходящий тон, который идеально гармонировал с оттенками цветовой палитры соседних румбов, чтобы создать легенду карты экспозиций склонов. Для этой цели была использована классификация значений на 8 направлений по 45° каждый и на плоские участки без явной экспозиции (угол менее $0,1^\circ$). Для построения гипсометрических кривых отдельных водосборных бассейнов создана программа на языке javascript на программной платформе GEE. С её применением извлекались географические координаты (широта, долгота) и названия рек (из шейп-файлов рек). По координатам точек находили соответствующие высоты из цифровых моделей высот рельефа (DEM) с каталога NASA/NASADEM_HGT/001 платформы Google Earth Engine(GEE). Определялись минимальные, максимальные высоты точек рек и распределение площадей участков рек по высоте. В программе Матлаб были построены нормированные кривые зависимости относительных высот h/N от относительных площадей s/S для каждой реки. Также для оценки морфометрических характеристик мы использовали показатель фрактальной размерности. Фракталы, которые применяются для описания извилистых линий и неровных поверхностей, имеют дробную размерность. Показатель фрактальной размерности (D) позволяет определить степень сложности фрактала, его способность заполнять пространство, а также неравномерность и фрагментацию геометрической структуры природного объекта. Как отмечено в работах (Федер, 1991; Мандельброт, 2002; Сидорчук, 2014), этот параметр является важным для изучения природных явлений. Мы использовали модифицированный метод боксов (Калуш и др., 2006) при определении показателя фрактальной размерности.

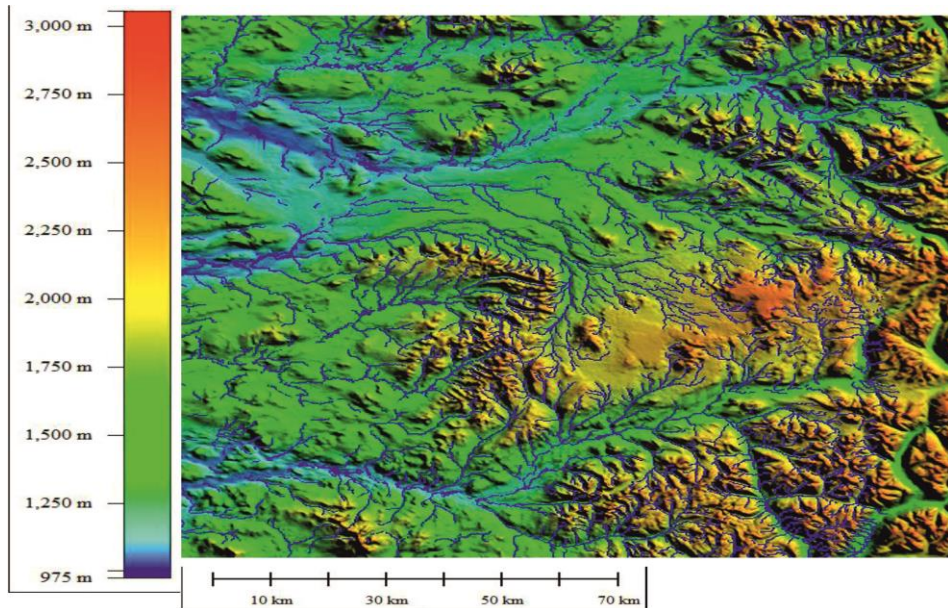


Рисунок 1. **Объект исследования** (гипсометрическая карто-схема)

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ И ОБСУЖДЕНИЕ. На основе ЦМР были созданы карты, отображающие углы наклона дневной поверхности, экспозицию склонов, а также проведён гипсометрический и фрактальный анализ водосборных бассейнов. Экспозиция склонов

определяет их ориентацию относительно сторон света. Карта экспозиции склонов, представленная на *рисунке 2* и охватывающая восемь основных направлений, показывает следующие результаты: склоны экспозиции *северо-восток* занимают 10,3 % от всей площади, *восточные* склоны — 9,7 %, *юго-восточные* — 11,5 %, *южные* — 14,9 %, *юго-западные* — 12,4 %, *западные* — 11,9 %, *северо-западные* — 12,6 %, а склоны экспозиции *север* составляют 16,7 %. Рельеф данной местности преимущественно горный, при этом на юго-востоке территории склоны получают равномерное освещение. Направление экспозиции склонов в данном районе преимущественно северное, что связано с расположением речных долин в рельефе. В западной части территории преобладает низкорельефный рельеф, изрезанный озёрами и речной сетью.

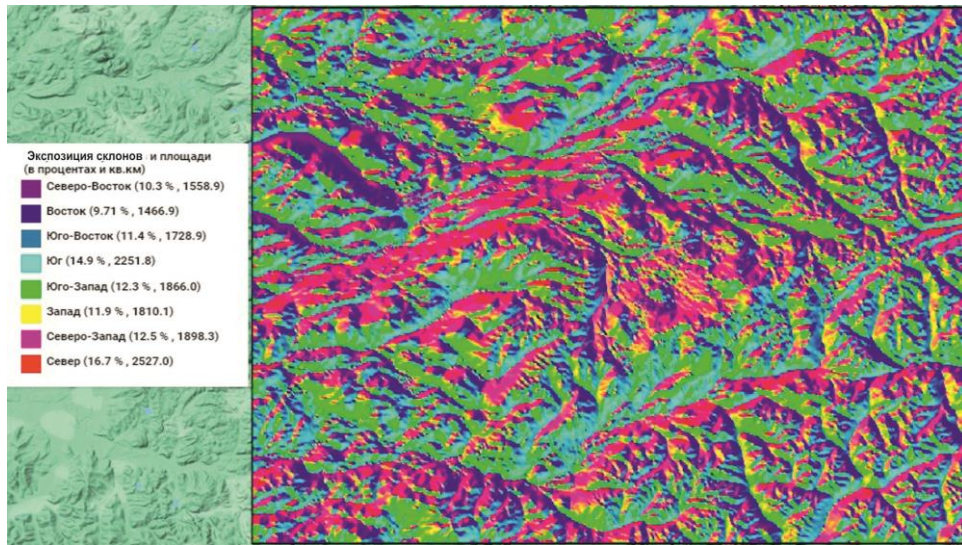


Рисунок 2. Экспозиция склонов

Для геоморфологических исследований важным фактором является анализ склонов, который отображён на *рисунке 3*. Наклон склона определяется как скорость изменения высоты ячейки при переходе к соседним точкам. Исследования показывают, что элементы склона в районах с переменным сопротивлением определяются литологией и климатоморфогенными процессами. Наклон местности является ключевым параметром для определения её характеристик. Более низкие значения угла наклона указывают на равнинную местность, тогда как более высокие значения наклона свидетельствуют о более крутой местности. Для оценки наклона используются процент или степень наклона. Большинство склонов (до 30 % площади) в территории исследования имеют крутизну от 0 до 5°. Такие склоны характерны для областей, где присутствует озёрная и речная сеть (*см. рис. 3*). Уклоны от 15 до 25° наблюдаются на юго-восточном и восточном направлении в предгорьях хр. Акад. Обручева (для притоков, имеющих порядок от 1 до 2).

При гипсометрическом анализе водосборных бассейнов использование ЦМР позволяет выявить характерные высотные ступени. Они являются свидетельством разнообразных факторов рельефообразования и наличия генетически неоднородных форм рельефа (Погорелов, Думит, 2008). Нами выполнен анализ территории общей площадью 505 960,4 км² со средней высотой рельефа 1750 м. Альтитуды от 600 м до 1000 м занимают 54 % местности, уровни от 1100 м до 2000 м — 44 %, а высоты более 2000 м — всего 1,2 % площади. Изучение гипсографической кривой данной территории показало, что рельеф имеет слабо выраженное ярусное строение. Однако, из-за масштабной несоразмерности исследуемых величин, сравнение абсолютных показателей высотного распределения площади проблематично. Вследствие чего гипсографические кривые на основе ЦМР строятся на относительной высоте (h/H) и от-

носительной площади (s/S), что позволяет анализировать гипсометрические особенности независимо от размеров и амплитуды высот (Погорелов, Думит, 2008).

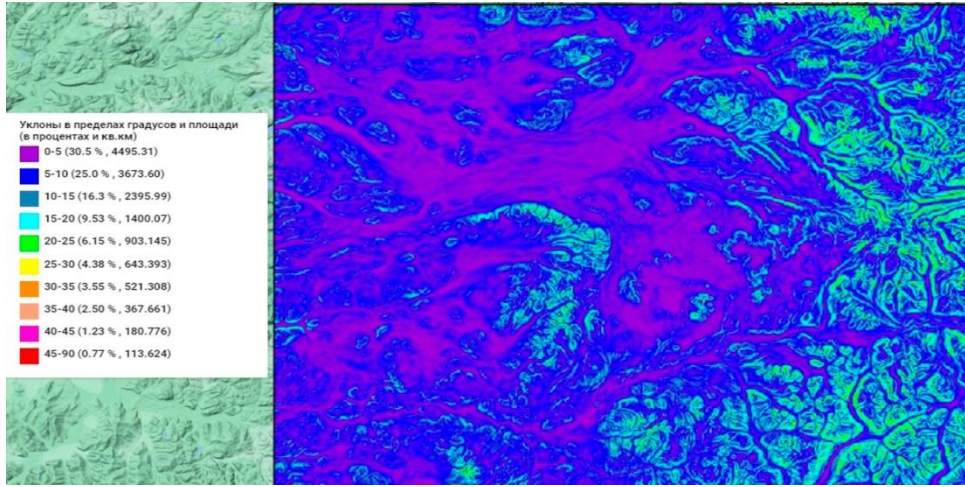


Рисунок 3. Уклоны склонов

Нами выполнен анализ водосборных бассейнов расположенных в границах исследуемой территории. Отметим, что семейство безразмерных гипсографических кривых территории исследования отличается разнообразием (рис. 4).

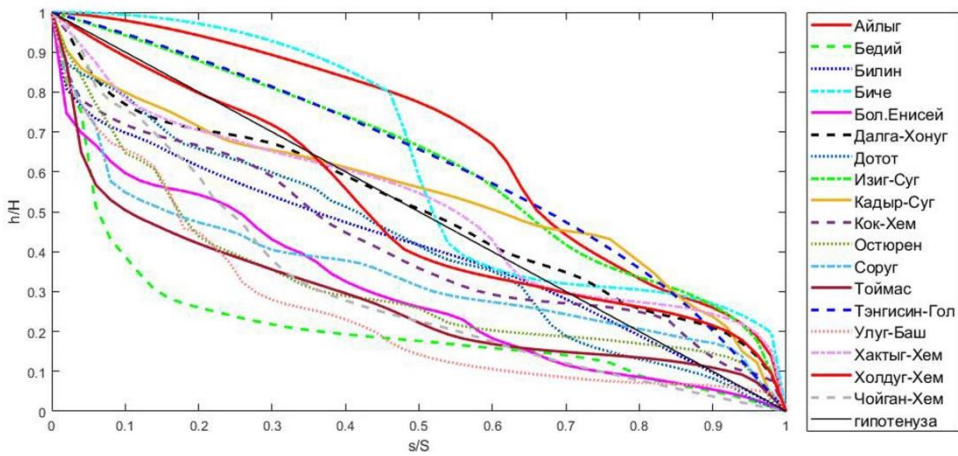


Рисунок 4. Гипсографические кривые водосборных бассейнов

При определении высотных характеристик гипсографических кривых необходимо учитывать размеры водосбора и пространственные пределы их действия. Гипсографическая кривая является линией в пространстве возможных состояний, которое определяется типом водосборного бассейна. Мы выделяем четыре типа кривых: вогнутые, близкие к линейным, выпуклые и меняющие направление выпуклости. Более выпуклые кривые обычно характерны для рек, текущих по крутым уклонам. На территории исследования таким видом отличаются водосборы рек Айлыг, Биче, Изиг-Суг и Тэнгисин-Гол. Вогнутые кривые рек чаще всего встречаются на относительно ровных участках. Водосборные бассейны рек Бедий, Билин, Соруг, Тоймас, Улуг-Баш и Чойган-Хем также имеют подобную форму кривой и располагаются преимущественно в среднегорье. Гипсографическая форма кривой указывает на наличие субгоризонтальной поверхности, являющейся ключевой морфологической особенностью всего водосбора.

Для водосборов, вид которых близок к линейному, свойственно пропорциональное распределение площади с высотой без явного влияния в каком-либо высотном интервале. Анализ кривой показывает отсутствие ярко выраженных рельефных уровней на одной высоте, что можно объяснить влиянием тектонических процессов на формирование рельефа. В этом типе водосборов характерно преобладание процессов денудации. Такого типа распределение можно аппроксимировать линейной функцией. В этом случае, на 0,3–0,5 относительной высоты приходится 0,5 относительной площади. К этому типу относятся водосборные бассейны рек Даалга-Хонуг, Додот, Кыдыр-Суг, Кок-Хем, Остюрен, Хактыг-Хем, Холдуг-Хем. Для описанных выше типов водосборных бассейнов было проведено вычисление показателя фрактальной размерности. Этот показатель отражает масштабную инвариантность геосистем, что позволяет анализировать объекты с различным масштабом и степенью генерализации (Берлянт и др., 1998). Водосборные бассейны с выпуклым типом гипсографической кривой имеют показатель D от 1,148 до 1,223. В водосборах, относящихся к вогнутому типу кривой, значение D изменяется от 1,190 до 1,199. Значение D водосборных бассейнов, для которых характерен тип кривой, близкий к линейному, меняется от 1,116 до 1,203. Прослеживается уменьшение значения показателя фрактальной размерности для выположенных водосборов и увеличение его для водосборов, расположенных на возвышенных участках территории. Изложенные выше особенности водосборов являются полезными при определении топографических и гидрологических характеристик этой территории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Проведены расчёты и построены карты морфометрических показателей поверхности Восточно-Тувинского лавового нагорья (уклоны и экспозиция склонов), построены гипсографические кривые, а также вычислены значения показателя фрактальной размерности отдельных водосборов. Изучение территории показало, что большинство склонов (30 % площади) имеют крутизну от 0 до 5°, это области, занятые озёрной и речной сетью. На территории исследования склоны экспозиции *север* преобладают — 16,7 %, что можно объяснить преимущественным направлением течения рек данной местности. Средняя высота местности составляет 1750 м, больше 50 % площади приходится на высоты от 600 до 1000 м, отметки высот от 1100 до 2000 м занимают 44 % территории. Данные исследования вносят определённый вклад в изучение морфологии Восточно-Тувинского лавового нагорья.

*Работа выполнена по государственному заданию ТувИКОПР СО РАН:
Научная тема № 121031300230-2.*

ЛИТЕРАТУРА

- Берлянт А.М., Мусин О.Р., Собчук Т.В. Картографическая генерализация и теория фракталов. – М., 1998. – 136 с.
- Калуш Ю.А., Логинов В.М., Чушикова С.А. Фрактальная размерность речной сети: Программа для ЭВМ. Патент РФ № 2006611604; заявитель и правообладатель Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН. – № 2006610092; заявл. 10.01.2006; зарег. 12.05.2006.
- Мандельброт Бенуа. Фрактальная геометрия природы. Пер. с англ. – М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
- Погорелов А.В., Думит Ж.А. Гипсометрический анализ поверхности бассейна р.Кубани // Географические исследования Краснодарского края: Сб. науч. тр. Вып. 3 / Отв. ред. А.В. Погорелов. – Краснодар: КубГУ, 2008. – С. 7–23.
- Сидорчук А.Ю. Фрактальная геометрия речных сетей // Геоморфология. – 2014. – № 3. – С. 112–120.
- Сугоракова А.М., Ярмолюк В.В., Лебедев В.И. Кайнозойский вулканизм Тувы / Отв. ред. докт. геол.-мин. наук А.Э. Изох. – Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2003. – 90 с.
- Федер Е. Фракталы. Пер. с англ. Ю.А. Данилова, А. Шукурова. – М.: Мир, 1991. – 260 с.

Хромых В.В., Хромых О.В. Опыт автоматизированного морфометрического анализа долинных геосистем Нижнего Притомья на основе цифровой модели рельефа // Вестн. Томского ГУ. – 2007. – № 298. – С. 208–210.

The geospatial processing service: Website Google [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://developers.google.com/earth-engine>, (accessed 30 December, 2021).

NASA EOSDIS Land Processes DAAC. (Website NASA (National Aeronautics and Space Administration) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://data.nasa.gov/dataset/NASADEM-Merged-DEM-Global-1-arc-second-V001/dqg3-mwid>, (accessed 30 December, 2021).

Landsat Missions. United States Geological Survey (USGS) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://lpdaac.usgs.gov/documents/1318/NASADEM_User_Guide_V12.pdf, (accessed 30 December, 2021).

REFERENCES

Berlyant A.M., Musin O.R., Sobchuk T.V. *Kartograficheskaya generalizatsiya i teoriya fraktalov* [Cartographic generalization and fractal theory]. Moscow, 1998, 136 p. (In Russ.)

Feder E. *Fraktaly* [Fractals]: Translation from English: Yu.A. Danilov, A. Shukurov. Moscow, Mir Publ, 1991, 260 p. (In Russ.)

Kalush Yu.A., Loginov V.M., Chupikova S.A. *Fraktal'naya razmernost' rechnoy seti: Programma dlya EVM* [Fractal dimension of the river network: Computer program]. RF patent no. 2006611604, 2006. (In Russ.)

Khromykh V.V., Khromykh O.V. Opyt avtomatizirovannogo morфометрического анализа dolinnykh геосистем Nizhnego Pritom'ya na osnove tsifrovoy modeli rel'yefa [Experience of automated morphometric analysis of valley geosystems of the Nizhneye Pritomye region based on a digital relief model]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the Tomsk State University*, 2007, no. 298, pp. 208–210. (In Russ.)

Landsat Missions. United States Geological Survey (USGS). Available at: https://lpdaac.usgs.gov/documents/1318/NASADEM_User_Guide_V12.pdf, (accessed 30 December, 2021).

Mandel'brot B.B. *Fraktal'naya geometriya prirody* [The fractal geometry of nature]: Translation from English. Moscow–Izhevsk, Institute for Computer Science Publ., 2002. 656 p. (In Russ.)

NASA EOSDIS Land Processes DAAC. (Website NASA (National Aeronautics and Space Administration). Available at: <https://data.nasa.gov/dataset/NASADEM-Merged-DEM-Global-1-arc-second-V001/dqg3-mwid>, (accessed 30 December, 2021).

Pogorelov A.V., Dumit ZH.A. Gipsometricheskii analiz poverkhnosti basseyna r. Kubani [Hypsometric analysis of the surface of the basin of the Kuban river]. *Geograficheskiye issledovaniya Krasnodarskogo kraya* [Geographical studies of the Krasnodar Territory]: Collection of scientific papers, is. 3 / ed. by A.V. Pogorelov. Krasnodar, Kuban State University Publ., 2008, pp. 7–23. (In Russ.)

Sidorchuk A.Yu. *Fraktal'naya geometriya rechnykh setey* [Fractal geometry of river networks]. *Geomorfologiya = Geomorphology*, 2014, no. 3, pp. 112–120. (In Russ.)

Sugorakova A.M., Yarmolyuk V.V., Lebedev V.I. *Kaynozoykiy vulkanizm Tuvy* [Cenozoic volcanism of Tuva] / ed. by A.E. Izokh. Kyzyl, TuvIENR SB RAS Publ., 2003, 90 p. (In Russ.)

The geospatial processing service: Website Google. Available at: <https://developers.google.com/earth-engine>, (accessed 30 December, 2021).