

Алгоритм расчёта базисных поверхностей на основе цифровой модели рельефа в программном обеспечении SAGA GIS (на примере Архангельской области)

Е. В. Полякова, Ю. Г. Кутинов, А. Л. Минеев, З. Б. Чистова

*Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
имени академика Н. П. Лаверова УрО РАН, Архангельск, 163020, Россия
E-mail: lenpo26@yandex.ru*

Представлен поэтапный алгоритм построения базисных поверхностей в программном обеспечении SAGA GIS. В качестве объекта исследований выбрана территория Архангельской обл., входящая в состав Восточно-Европейской равнины. Исходным материалом для расчётов служила цифровая модель рельефа (ЦМР), построенная на основе ASTER GDEM v2 с пространственным разрешением около 30 м. Базисные поверхности рассчитываются на основе ЦМР (после её гидрологической коррекции) и карты порядков водотоков от 1 до N . Долинам 1-го и 2-го порядка соответствуют овраги, промоины и временные (сезонные) ручьи. На равнинных территориях и в условиях умеренного климата постоянный водоток обычно имеют речные долины, начиная с 3-го и 4-го порядка. Максимальный порядок водотока, равный 10, на территории Архангельской обл. соответствует р. Северной Двине. Морфометрические поверхности рассчитываются для оценки неотектонических подвижек земной коры. Карты базисных поверхностей — это статические карты, они дают возможность количественно оценивать амплитуду неотектонических движений без учёта их временного развития.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, водосборная площадь, гидросеть, порядок водотоков, базисная поверхность, Архангельская область

Одобрена к печати: 23.06.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-104-115

Введение

Известно, что рельеф представляет собой совокупность неровностей земной поверхности различных размеров. Неровности — это формы рельефа, которые могут быть положительными (выпуклыми) или отрицательными (вогнутыми) и измеряются относительно базисных уровней (уровня моря, глубины эрозионного вреза). В морфометрическом (количественном) анализе для описания и оценки состояния и общей тенденции эволюции рельефа используются абстрактные поверхности (базисная, вершинная, разностная, остаточного рельефа, средних высот), а также другие параметры соотношений абстрактных поверхностей (Трегуб, Жаворонкин, 2000).

Морфометрический метод расчёта базисных поверхностей был разработан во второй половине прошлого века В. П. Философовым и А. Н. Ласточкиным (Ласточкин, 1971; Философов, 1975) и достаточно успешно применялся в гидрологических, геоморфологических и геологических исследованиях. Ими и другими исследователями была показана высокая информативность метода для количественной оценки современных тектонических движений. Однако в связи с ручным выполнением расчётов по топографическим картам метод довольно быстро исчерпал себя технически, так же как и подобные картографические методы, например расчёт плотности, изотропности и специфичности гидросети и др. Развитие геоморфометрии, вкуче с появлением глобальных цифровых моделей рельефа (ЦМР) открытого доступа и свободно распространяемых программных продуктов ГИС (геоинформационные системы), позволило значительно снизить трудоёмкость метода, повысить его точность и вычислительную эффективность, а также дало возможность использовать более многовариантный морфометрический анализ. Кроме того, современные технологии крайне востребованы при проведении исследований на обширных лесопокрытых и труднодоступных территориях, к каковым относится Архангельская обл.

В последние десятилетия отмечается повышенный интерес к расчётам морфометрических поверхностей рельефа для учёта неотектонических подвижек земной коры. Наиболее распространённой ЦМР для расчёта морфометрических поверхностей выступает достаточно хорошо отредактированная её создателями SRTM 3 (*англ.* Shuttle Radar Topography Mission) (Дробинина, 2021; Нугманов и др., 2016; Погорелов, Думит, 2009; Чернова и др., 2010; Шевырев, 2017 и др.). Пространственное разрешение модели — порядка 30 м для США и 90 м для остальной территории, точность по высоте — 11,2–18 м, покрытие — 60° с. ш. и 56° ю. ш. То есть данная модель не обеспечивает покрытие Архангельской обл., поэтому необходимо было использование других моделей.

Для исследуемого региона полное покрытие имеют следующие ЦМР, находящиеся в свободном доступе: ASTER GDEM (*англ.* Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model) с разрешением 1 угл. с (около 30 м) и ArcticDEM с разрешением до 2 м. Однако, несмотря на более детальное разрешение, совокупная площадь отсутствующих данных на территорию Архангельской обл. для модели ArcticDEM составляет 14,49 %, в то время как для ASTER GDEM v2 — 1,24 % (Полякова и др., 2020а, б). Поэтому для проведения исследований авторами была выбрана ЦМР ASTER GDEM v2 (Кутинов и др., 2019).

Модули для расчёта гидрографических характеристик рек и речных бассейнов, построения гидросети и водосборных бассейнов содержатся в большинстве программных продуктах ГИС. Чаще для морфометрического расчёта базисных поверхностей на основе ЦМР авторы используют программную среду ESRI (*англ.* Environmental Systems Research Institute) ArcGIS (Курлович, 2010; Нугманов и др., 2016; Погорелов, Думит, 2009; Чернова и др., 2005 и др.). Имеется опыт применения продуктов Matlab (Шевырев, 2017), Golden Software Surfer (Ермолаев, Семенов, 2014), GEOstatistika (Трегуб, Жаворонкин, 2000), а также авторских программ, например TAS (*англ.* Terrain Analysis System) (Lindsay, 2005).

SAGA (*англ.* System for Automatized Geoscientific Analysis) — свободно распространяемое программное обеспечение (ПО), в котором заключена расширенная линейка инструментов гидрологического анализа и моделирования. Цель настоящей статьи заключается в представлении поэтапного алгоритма построения базисных поверхностей в ПО SAGA GIS на территорию Архангельской обл. для дальнейших геоэкологических исследований.

Алгоритм расчёта базисных поверхностей

Базисной называют поверхность, объединяющую местные базисы эрозии — самые низкие точки в рельефе, вершинной — самые высокие. Базисные поверхности различают по порядкам (Чернова и др., 2010), и соответственно, основой построения базисных поверхностей становится карта порядков долин (порядков водотоков). В настоящей работе для расчёта порядков водотоков использовался метод Стралера (Strahler, 1957). Все расчёты производились в ПО SAGA GIS. В принципе данный метод характерен практически для всех геоинформационных систем, но различается (в зависимости от структуры применяемого ПО) расчётными модулями и связями между ними.

Однако, прежде чем построить карту порядков водотоков, необходимо совершить ряд предварительных операций, таких как расчёт водосборных площадей, моделирование гидросети. Все эти операции нужно осуществлять на гидрологически корректной ЦМР.

В данном случае алгоритм расчёта базисных поверхностей в ПО SAGA GIS состоял из нескольких этапов (*рис. 1*, см. с. 106) (в тезисном виде приведено в работе (Полякова и др., 2021)).

Основой для морфометрических расчётов, т. е. исходными данными, представляется цифровая модель рельефа Архангельской обл., построенная авторами ранее на базе ЦМР ASTER GDEM v2 (Минеев и др., 2015а, б). В большинстве исследований используются данные ЦМР без предварительной подготовки, т. е. в «сыром виде», содержащие многочисленные артефакты и ошибки, зачастую скрытые создателями ЦМР в виде определённых значений высот.

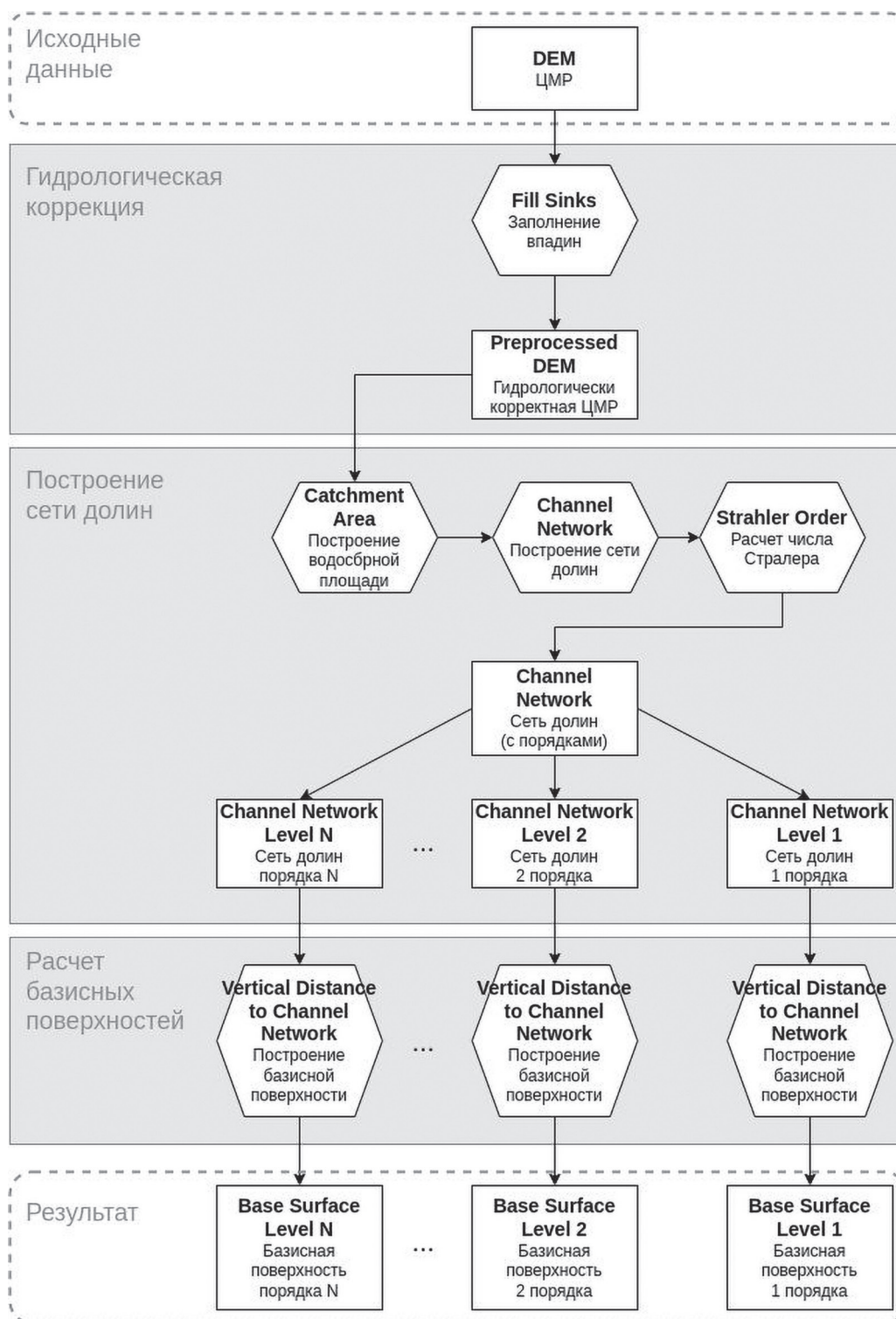


Рис. 1. Общий алгоритм расчёта базисных поверхностей в ПО SAGA GIS

Подготовка ЦМР к дальнейшим расчётам включала в себя: извлечение и объединение данных; замену аномальных значений высотных отметок и «пустот» данными глобальной ЦМР GMTED2010 с искусственным уменьшением размера ячейки GMTED2010 до 1 угл.с (около 30 м); устранение ошибок, возникающих при наложении снимков. Следом проводилась оценка корректности построенной модели (Минеев и др., 2018). Дальнейшие манипуляции осуществлялись на подготовленной, «вычищенной» и релевантной ЦМР Архангельской обл.

Гидрологическая коррекция ЦМР

Цифровая модель рельефа — это растровое изображение, состоящее из ячеек, каждой из которых присвоено своё значение высоты. Суть гидрологического моделирования заключается в том, что вода перетекает из ячейки с большим значением высоты в близлежащую соседнюю ячейку с меньшим значением. Таким образом, ячейки ЦМР связываются между собой, образуя вначале поток вниз по склону, а затем формируя сеть потоков. Однако в любой ЦМР существуют ошибки в виде замкнутых локальных понижений — бессточные впадины. Это могут быть отдельные ячейки либо группы ячеек. Линейные группы бессточных ячеек формируют бессточные потоки. Для устранения подобных бессточных понижений в цифровой модели рельефа проводится её гидрологическая коррекция.

Существует значительное количество автоматических методов и алгоритмов устранения бессточных впадин из ЦМР (Минеев и др., 2015а, б). В ПО SAGA GIS реализованы методы, разработанные исследователями Л. Вангом и Х. Лью (Wang, Liu, 2006), О. Планшоном и Ф. Дарбу (Planchon, Darboux, 2002). В настоящем исследовании гидрологическая коррекция проведена с помощью модуля Fill Sinks по методу Ванга и Лью (Wang, Liu, 2006), поскольку он обладает наибольшей вычислительной эффективностью. На выходе получаем гидрологически корректную ЦМР Архангельской обл.

Построение сети долин

В начале данного этапа необходимо рассчитать водосборные площади. Если в гидрологии под этим понятием понимается часть земной поверхности и толщи почв, грунтов и горных пород, откуда вода поступает к определённому водному объекту (Михайлов, Добролюбов, 2017), то в цифровом моделировании площадь водосбора (*англ.* Catchment Area) — это растр аккумуляции стока (*англ.* Flow Accumulation Raster) в каждой ячейке. Значение в ячейке характеризует ту площадь, с которой она получила воду из соседних, вышележащих по склону ячеек. Фактически это число показывает водосборную площадь для каждой ячейки раstra.

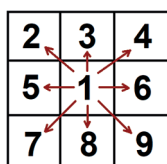


Рис. 2. Восемь возможных направлений стока по растре (Kiss, 2004)

При моделировании водосборных площадей (построении модели аккумуляции осадков) средствами ЦМР применяется метод последовательного рассмотрения каждой ячейки и её окружения. При таком подходе существует восемь возможных направлений стока из рассматриваемой ячейки к одной из соседних ячеек (рис. 2).

Расчёт площади водосбора осуществляется на базе различных алгоритмов. Наиболее популярные из них детально освещены в статье (Кошель, Энтин, 2017). Здесь мы рассмотрим только два алгоритма: D8 (*англ.* Deterministic Eight Neighbor) и MFD (*англ.* Multiple Flow Direction), реализованные в ПО SAGA GIS, чтобы разобраться в их принципиальном различии (рис. 3, см. с. 108).

В алгоритме D8 (O'Callaghan, Mark, 1984) поток воды из рассматриваемой центральной ячейки целиком направляется в ту из восьми соседних, которая имеет меньшую высоту и наибольший уклон (см. рис. 3б). Это простой метод однонаправленного и связанного движения потока, его основной недостаток — построение нереалистичной сети долин, поскольку максимальный уклон может иметь более чем одна соседняя ячейка (Кошель, Энтин, 2017).

В алгоритме MFD (Freeman, 1991; Quinn et al., 1991) учитывается эффект расхождения потоков, при котором считается, что сток воды из рассматриваемой ячейки происходит не только в самую низкую ячейку, но во все ячейки окружения, которые ниже рассматриваемой (см. рис. 3в). Чтобы рассчитать долю переносимой воды, вначале рассматривается разница высот между центральной ячейкой и её окружением (рис. 4б, см. с. 108). Отрицательные значения разностей принимаются за ноль и в расчётах не участвуют. Положительные значения окружающих ячеек суммируются, значение суммы присваивается центральной ячейке, и пропорционально рассчитываются доли потока (рис. 4в).

Такой алгоритм позволяет строить более реалистичную сеть долин, жертвуя при этом её связанностью (Кошель, Энтин, 2017). Тем не менее в данном исследовании применялся именно этот алгоритм расчёта водосборной площади (рис. 5).

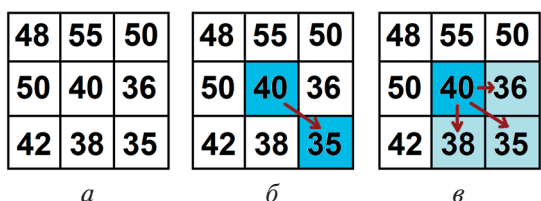


Рис. 3. Распределение движения потока в алгоритмах D8 и MFD (цифрами обозначены условные значения высот, м)

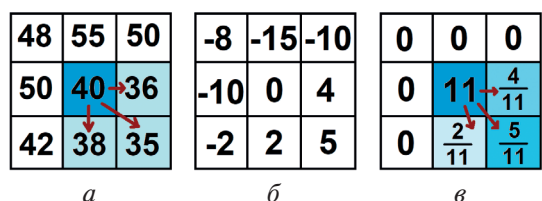


Рис. 4. Расчёт доли потока в алгоритме MFD (цифрами обозначены условные значения высот, м)

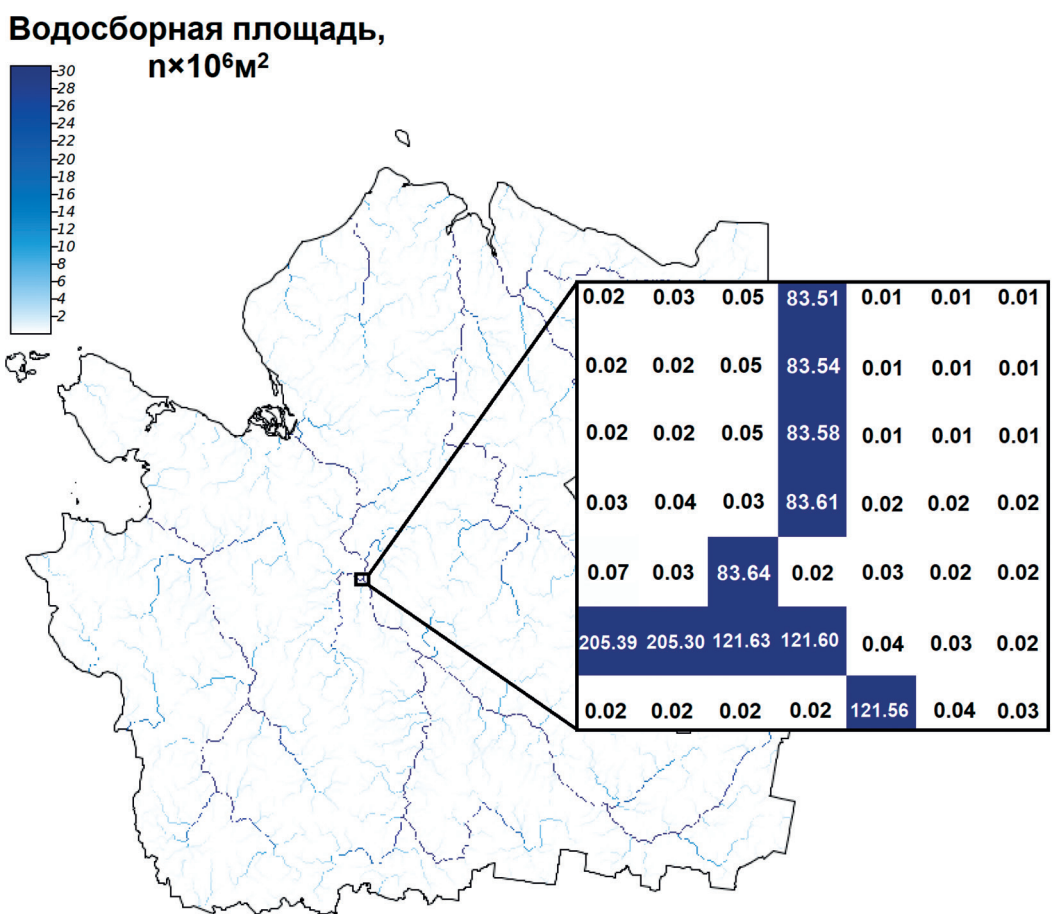


Рис. 5. Водосборная площадь с увеличенным фрагментом

Площадь водосбора необходима для автоматического построения гидросети (англ. Channel Network).

В гидрологии под гидрографической сетью понимают совокупность водотоков (рек, ручьёв, каналов) и водоёмов (океанов, морей, озёр, водохранилищ, прудов, болот) в пределах какой-либо территории (Михайлов, Добролюбов, 2017). В цифровом моделировании сеть долин — это сеть потенциальных водотоков, отличающихся друг от друга на несколько порядков.

Моделирование гидросети средствами ЦМР — это процесс выделения из раstra информации о расположении потоков на исследуемой территории в виде векторных данных.

Обычно в качестве иницилирующего растра выбирается грид водосборной площади (см. рис. 5), затем определяется пороговое значение, чтобы выяснить, принадлежит ли ячейка потоку, и происходит последовательный анализ ячеек. Каждое значение ячейки сравнивается с пороговым. Ячейки, значение водосборной площади в которых меньше порогового, откидываются, остальные объединяются в линии гидросети. Пороговое значение водосборной площади было выбрано $10\,000\text{ м}^2$, оно обусловлено значительными размерами территории исследования (площадь Архангельской обл. более $500\,000\text{ км}^2$). Порядок водотока определялся по методу Стралера (Strahler, 1957). Суть заключается в том, что если поток не имеет притока, ему присваивается 1-й порядок. При слиянии двух потоков 1-го порядка получается поток 2-го порядка, двух потоков 2-го порядка — поток 3-го порядка и т. д. Следует отметить, что порядок потока N изменится на $N+1$ согласно (Strahler, 1957) только в том случае, если пересекутся два потока одного и того же порядка. Если сольются потоки 1-го и 2-го порядков, результирующим всё равно останется поток 2-го порядка.

В результате строится карта порядков водотоков от 1-го до N -го с помощью модуля Channel Network в ПО SAGA GIS (рис. 6), где N — это наивысший порядок водотока. Данная карта служит основой для расчётов всех остальных морфометрических поверхностей.

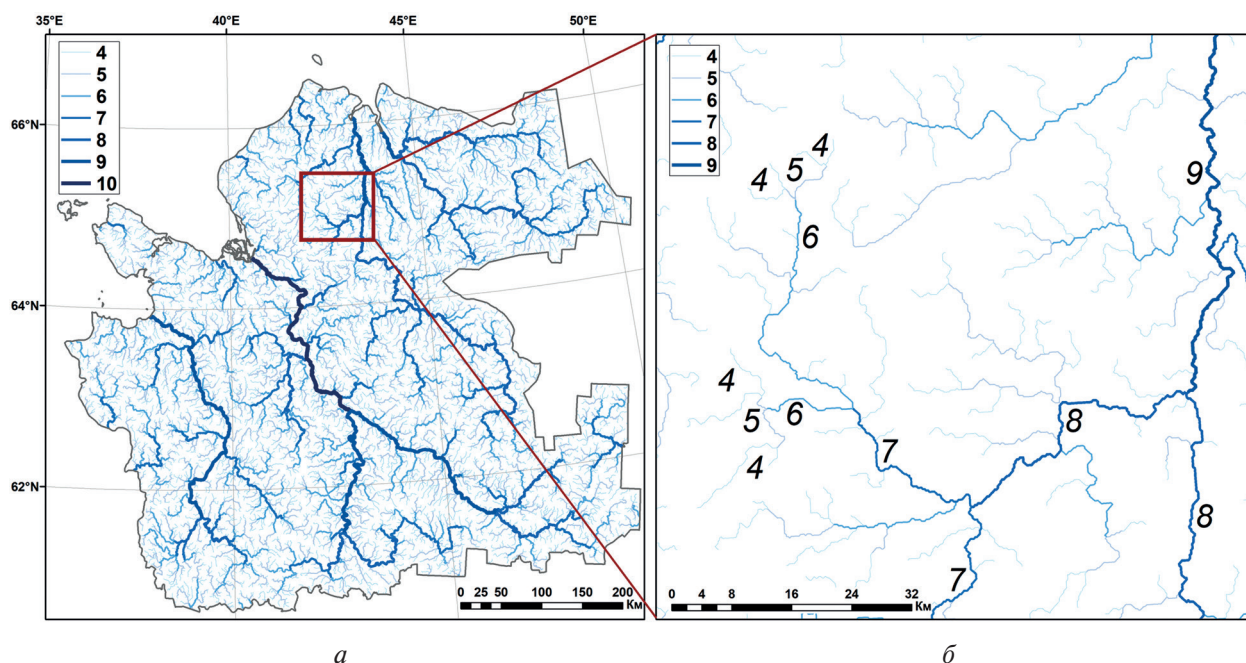


Рис. 6. Порядок водотоков для территории Архангельской обл. (а) и увеличенный фрагмент (б)

Водотоки могут быть постоянными и временными (пересыхающими). На равнинных территориях и в условиях умеренного климата постоянный водоток обычно имеют речные долины, начиная с 3-го и 4-го порядка. Долинам 1-го и 2-го порядка соответствуют овраги, промоины и временные (сезонные) ручьи. В нашем случае расчёты начинались с водотоков 4-го порядка. Максимальный порядок водотока, равный 10, на территории Архангельской обл. имеет р. Северная Двина.

Расчёт базисных поверхностей

Построение гридов базисных поверхностей от первого до наивысшего порядка осуществляется с применением модуля Vertical Distance to Channel Network. Данный модуль вычисляет вертикальное расстояние от сети каналов до базового уровня (уровень моря) (Olaya, Congrad, 2009). На вход модулю подаётся гидрологически корректная ЦМР и карта порядков водо-

токов Архангельской обл. Для построения базисной поверхности 4-го порядка применяется сеть долин от 4-го до 10-го (максимального) порядка. Для построения базисной поверхности 5-го порядка — сеть долин 5-го и всех последующих порядков и так далее (рис. 7).

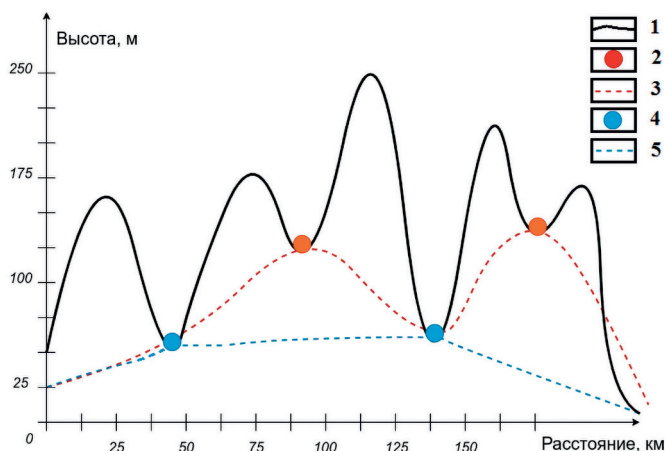


Рис. 7. Условная схема построения базисных поверхностей: 1 — профиль высот; 2 — водоток N -го порядка; 3 — базисная поверхность N -го порядка; 4 — водоток $(N+1)$ -го порядка; 5 — базисная поверхность $(N+1)$ -го порядка

Результатом работы алгоритма становится серия гридов базисных поверхностей от 4-го до 10-го порядка, каждый из которых строится путём интерполяции значений между линиями водотоков соответствующих порядков (рис. 8).

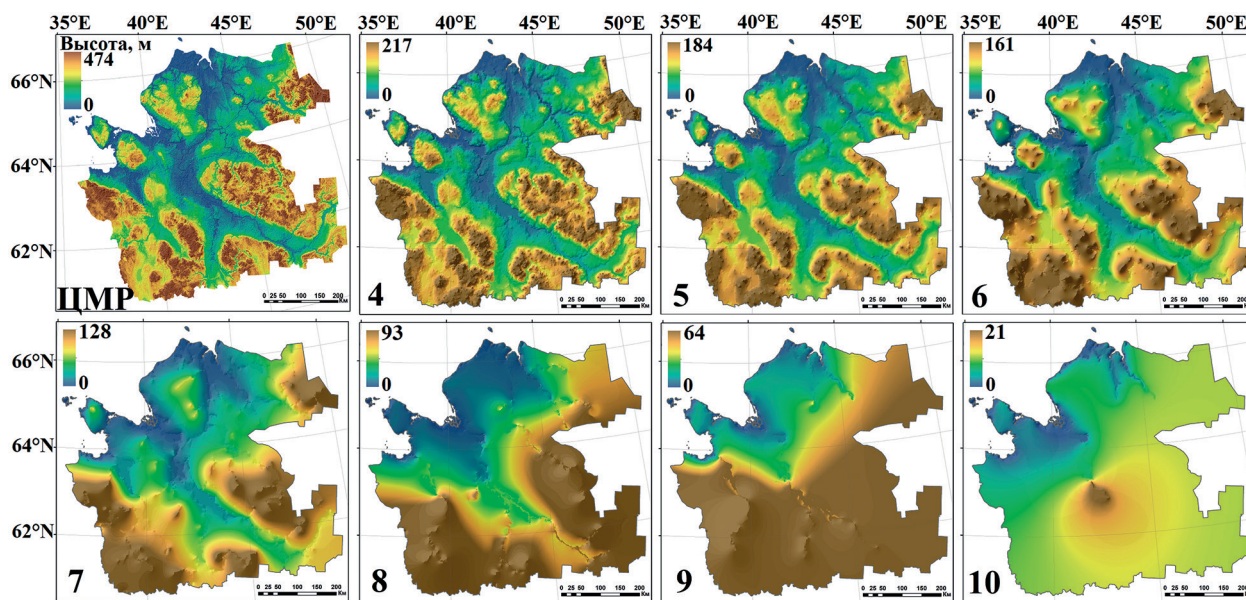


Рис. 8. Цифровая модель рельефа и карты базисных поверхностей от 4-го до 10-го порядка (нумерация порядков показана на рисунках)

Водотоки определённых порядков не покрывают равномерно всю площадь исследований. Чем выше порядок, тем больше расстояние между точками водотоков, тем более условная поверхность получается на выходе. Так, например, 9-й порядок имеют реки Онега, Вага и Северная Двина до места слияния с р. Вагой. А 10-й порядок у Северной Двины ниже впадения Ваги. Поэтому базисные поверхности первых (низших) порядков незначительно от-

личаются от исходной ЦМР, т. е. от поверхности дневного рельефа (см. рис. 8). Базисная поверхность наиболее высокого порядка, в нашем случае 10-го, становится нижним пределом денудационной поверхности выравнивания, к которой стремится рельеф на данном этапе своего развития (Нугманов и др., 2016).

В работе (Чернова и др., 2010, с. 18) отмечается, что «для количественной оценки амплитуды вертикальных движений, а также выявления локальных активных структур более полезны карты разностей базисных поверхностей». Разностные модели также часто применяются при расчёте потенциальной энергии рельефа (Кузнецов, 2014; Кутинов и др., 2022). По сути, разностные модели — это алгебраическая разность базисных поверхностей различных порядков, как правило смежных (Философов, 1975). Расчёт разностей базисных поверхностей для территории Архангельской обл. выполнялся с помощью модуля Grid Calculator вычитанием значений соответствующих ячеек порядковых поверхностей. Аналогично рассчитывались вершинные поверхности, но вместо водотоков анализировались водоразделы. Отметим, что вершинные поверхности в принципе оказываются «зеркальным отражением» базисных.

Таким образом, получен набор карт (слоёв) морфометрических поверхностей для дальнейшего геоэкологического анализа территории (рис. 9).

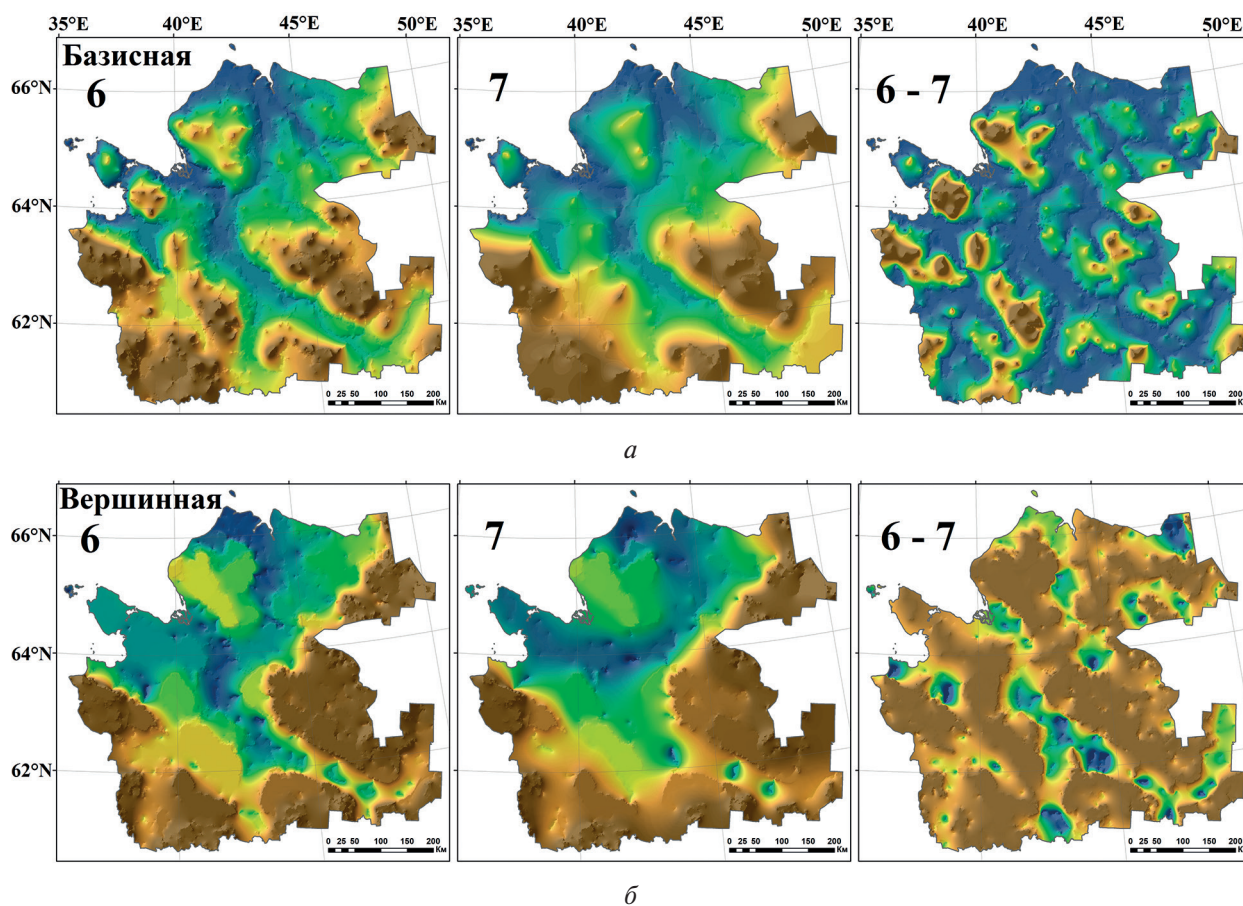


Рис. 9. Пример базисных (а) и вершинных (б) поверхностей и их разниц (номера порядков и разниц показаны на рисунках)

Выводы

Обычно расчёт морфометрических поверхностей проводится для локальных территорий с относительно однородным геологическим строением, где физико-механическими свойствами пород можно условно пренебречь. Территория Архангельской обл. характеризуется небольшими абсолютными значениями высот и слабой расчленённостью рельефа с широким распро-

странением низменных заболоченных и «плоских» пространств, сменяемых слабохолмистыми равнинами.

Расчёт базисных и разностных поверхностей показал, что наиболее низкий уровень базиса эрозии характерен для водосборного бассейна р. Северной Двины и частично р. Пинеги, что, в свою очередь, обуславливает развитие плоскостного смыва и влияет на качество речных вод. Расчёт вершинных поверхностей подтвердил полученные выводы. Наиболее низкий базис эрозии характерен для поверхностей 9-го и 10-го порядка. То есть он отражает длительность развития водотоков: чем выше порядок водотока, тем ниже базис эрозии (см. *рис. 8*), изменяющийся от 474 до 21 м (осреднённые показатели).

Современные методы геоморфометрии и глобальные ЦМР позволяют оперативно рассчитывать базисные, разностные, вершинные и другие типы поверхностей рельефа, комбинируя различные порядки этих поверхностей, что даёт обширную информацию для геоэкологических исследований и оценки интенсивности современных движений земной коры при малых затратах. Однако карты базисных поверхностей — это статические карты, они дают возможность количественно оценивать амплитуды неотектонических движений без учёта их временного развития.

Исследование проведено в ходе выполнения государственного задания Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики УрО РАН, госрегистрация № 122011300380-5.

Литература

1. Дробинина Е. В. Оптимизация камеральной обработки материалов инженерно-геологических изысканий с использованием ГИС // Материалы 16-й Общероссийской научно-практич. конф. изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». М.: Геомаркетинг, 2021. С. 93–99.
2. Ермолаев О. П., Семенов Ф. В. Использование цифровых моделей рельефа для морфометрического анализа тектонических структур и поиска россыпей аллювиального генезиса // География и природные ресурсы. 2014. № 1. С. 142–147.
3. Кошель С. М., Энтин А. Л. Вычисление площади водосбора по цифровым моделям рельефа на основе построения линий тока // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5. География. 2017. № 3. С. 42–50.
4. Кузнецов А. С. Энергетический подход в геоморфологическом картографировании // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 1688–1688.
5. Курлович Д. М. Неотектонические структуры и неотектонически активные линейные зоны Белорусского Поозерья // Вестн. Белорусского гос. ун-та. Сер.: География. 2010. № 2. С. 99–105.
6. Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Полякова Е. В., Чистова З. Б. Выбор базовой цифровой модели рельефа (ЦМР) равнинных территорий Севера Евразии и её подготовка для геологического районирования (на примере Архангельской области). Пенза: Социосфера, 2019. 177 с.
7. Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б., Полякова Е. В., Беленович Т. Я. Потенциальная энергия рельефа: методики расчета, проблемы, варианты // Уральский геолог. журн. 2022. № 6(150). С. 17–31.
8. Ласточкин А. Н. О формах проявления разрывных нарушений в рельефе Западно-Сибирской равнины и структурно-геоморфологическом методе их обнаружения // Изв. Всесоюз. георг. общества. 1971. № 1. С. 48–56.
9. Минеев А. Л., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б., Полякова Е. В. (2015а) Подготовка цифровой модели рельефа для исследования экзогенных процессов северных территорий Российской Федерации // Пространство и время. 2015. № 3(21). С. 279–291.
10. Минеев А. Л., Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б. (2015б) Методические аспекты создания цифровой модели рельефа Архангельской области на основе ASTER GDEM V.2 // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. 8 с. <https://science-education.ru/129-21949>.
11. Минеев А. Л., Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б. Надёжность цифровой модели рельефа Архангельской области для проведения геоэкологических исследований // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 58–67. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-58-67.
12. Михайлов В. Н., Добролюбов С. А. Гидрология: учебник для вузов. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2017. 752 с.

13. Нугманов И. И., Нугманова Е. В., Чернова И. Ю. Основы морфометрического метода поиска неотектонических структур. Казань: Казанский ун-т, 2016. 53 с.
14. Погорелов А. В., Думит Ж. А. Рельеф бассейна р. Кубани: морфологический анализ. М.: ГЕОС, 2009. 220 с.
15. Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б. (2020а) Анализ возможности применения цифровых моделей рельефа ASTER GDEM v2 и ArcticDEM для исследований арктических территорий России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 117–127. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127.
16. Полякова Е. В., Минеев А. Л., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б. (2020б) Оценка исходных данных глобальной модели ArcticDEM для исследований северных территорий РФ // Уральский геолог. журн. 2020. № 5(137). С. 3–17.
17. Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б. Алгоритм расчета базисных поверхностей на основе ЦМР Архангельской области для геоэкологических исследований // Материалы 19-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–10 нояб. 2021, Москва. 2021. С. 324.
18. Трегуб А. И., Жаворонкин О. В. Морфометрия современной поверхности и неотектоническая структура территории ВКМ // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Сер.: Геология. 2000. Вып. 9. С. 19–26.
19. Философов В. П. Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1975. 232 с.
20. Чернова И. Ю., Хасанов Д. И., Жарков И. Я., Бильданов Р. Р., Каширина Т. С. Обнаружение и исследование зон новейших движений земной коры инструментами ГИС // ArcReview. М.: Дата+, 2005. № 1(32). С. 6–7.
21. Чернова И. Ю., Нугманов И. И., Даутов А. Н. Применение аналитических функций ГИС для усовершенствования и развития структурно-морфологических методов изучения неотектоники // Геоинформатика. 2010. № 4. С. 9–22.
22. Шевырев С. Л. Неотектоника и особенности эродированности контролирующих структур многовершинного золоторудного поля (Хабаровский край) по результатам дистанционного зондирования // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Сер.: Геология. 2017. № 4. С. 72–78.
23. Freeman T. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid // Computers and Geosciences. 1991. V. 17. P. 413–422.
24. Kiss R. Determination of drainage network in digital elevation models, utilities and limitations // J. Hungarian Geomathematics. 2004. V. 2. P. 17–29.
25. Lindsay J. B. The Terrain Analysis System: a tool for hydro-geomorphic applications // Hydrological Processes. 2005. V. 19. No. 5. P. 1123–1130. DOI: 10.1002/hyp.5818.
26. O'Callaghan J. F., Mark D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data // Computer Vision, Graphics, and Image Processing. 1984. V. 28(3). P. 323–344.
27. Olaya V., Conrad O. Geomorphometry in SAGA // Developments in Soil Science. 2009. V. 33. P. 293–308. DOI: 10.1016/S0166-2481(08)00012-3.
28. Planchon O., Darboux F. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models // Catena. 2002. V. 46(2). P. 159–176. DOI: 10.1016/S0341-8162(01)00164-3.
29. Quinn P., Beven K., Chevallier P., Planchon O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling // Hydrological Processes. 1991. V. 5(5). P. 59–79.
30. Strahler A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology // Eos, Trans. American Geophysical Union. 1957. V. 38. No. 6. С. 913–920.
31. Wang L., Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modeling // Intern. J. Geographical Information Science. 2006. V. 20(2). P. 193–213. DOI: 10.1080/13658810500433453.

Algorithm for calculation of basic surfaces based on digital elevation model in SAGA GIS software (on the example of Arkhangelsk Region)

E. V. Polyakova, Yu. G. Kutinov, A. L. Mineev, Z. B. Chistova

*N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research UrB RAS
Arkhangelsk 163020, Russia
E-mail: lenpo26@yandex.ru*

The article presents a step-by-step algorithm for constructing basic surfaces in the SAGA GIS software. The territory of Arkhangelsk Region, which is part of East European Plain, is chosen as the object of research. The source material for the calculations is a digital elevation model (DEM) built on the basis of ASTER GDEM v2 with a spatial resolution of about 30 m. Reference surfaces are calculated based on the DEM (after its hydrological correction) and a map of stream orders from 1 to N . Valleys of orders 1 and 2 correspond to ravines, gullies and temporary (seasonal) streams. In flat areas and in temperate climates, river valleys usually have a constant stream, starting from orders 3 and 4. The maximum stream order equal to 10 on the territory of Arkhangelsk Region corresponds to the Northern Dvina River. Morphometric surfaces are calculated to evaluate the neotectonic movements of the Earth's crust. Basic surface maps are static maps; they make it possible to quantify the amplitudes of neotectonic movements without taking into account their temporal development.

Keywords: digital elevation model, catchment area, channel network, stream order, basic surfaces, Arkhangelsk Region

Accepted: 23.06.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-104-115

References:

1. Drobinina E. V., Optimization of office studies of the engineering surveys results using GIS, *Materialy 16-i Obshcherossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii izyskatel'skikh organizatsii "Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskaniy v stroitel'stve v Rossiiskoi Federatsii"* (Proc. 16th All-Russia Scientific and Practical Conf. Surveying Organizations "Prospects for Development of Engineering Surveys in Construction in the Russian Federation"), Moscow: Geomarketing, 2021, pp. 93–99 (in Russian).
2. Ermolaev O. P., Semenov F. V., Use of digital terrain models in morphometric analysis of tectonic structures and prospecting of placers of alluvial genesis, *Geography and Natural Resources*, 2014, Vol. 35, No. 1, pp. 82–87, DOI: 10.1134/S1875372814010120.
3. Koshel S. M., Entin A. L., Catchment area derivation from gridded digital elevation models using the flowline-tracing approach, *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geografiya*, 2017, No. 3, pp. 42–50 (in Russian).
4. Kuznetsov A. S., An Energy approach for geomorphological mapping, *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2014, No. 6, pp. 1688–1688 (in Russian).
5. Kurlovich D. M., Neotectonic structures and neotectonically active linear zones of the Belarusian Poozerya, *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Geografiya*, 2010, No. 2, pp. 99–105 (in Russian).
6. Kutinov Yu. G., Mineev A. L., Polyakova E. V., Chistova Z. B., *Vybor bazovoi tsifrovoy modeli rel'efa (TsMR) ravninnykh territorii Severa Evrazii i ee podgotovka dlya geologicheskogo raionirovaniya (na primere Arkhangel'skoi oblasti)* (The choice of the basic digital elevation model (DEM) of the plain territories of the North of Eurasia and its preparation for geological zoning (on the example of the Arkhangelsk region)), Penza: Sotsiosfera, 2019, 177 p. (in Russian).
7. Kutinov Yu. G., Mineev A. L., Chistova Z. B., Polyakova E. V., Belenovich T. Ya., Relief energy: calculation, methods, problems, options, *Ural'skii geologicheskii zhurnal*, 2022, No. 6, Vol. 150, pp. 17–31 (in Russian).
8. Lastochkin A. N., On the forms of manifestation of discontinuous faults in the relief of the West Siberian Plain and the structural-geomorphological method of their detection, *Izvestiya Vsesoyuznogo geograficheskogo obshchestva*, 1971, No. 1, pp. 48–56 (in Russian).
9. Mineev A. L., Kutinov Yu. G., Chistova Z. B., Polyakova E. V. (2015a), Building the digital elevation model for studying exogenous processes across northern territories of Russian Federation, *Prostranstvo i vremya*, 2015, No. 3(21), pp. 279–291 (in Russian).

10. Mineev A. L., Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Chistova Z. B. (2015b), Methodical aspects of creating digital elevation model of the Arkhangelsk region based on ASTER GDEM V.2, *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, No. 2 (in Russian), <https://science-education.ru/129-21949>.
11. Mineev A. L., Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Chistova Z. B., The reliability of a digital elevation model of the Arkhangelsk region for geoecological research, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 58–67 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-58-67.
12. Mikhailov V. N., Dobrolyubov S. A., *Gidrologiya: uchebnik dlya vuzov* (Hydrology: a textbook for universities), Moscow, Berlin: Direkt-Media, 2017, 752 p. (in Russian).
13. Nugmanov I. I., Nugmanova E. V., Chernova I. Yu., *Osnovy morfometricheskogo metoda poiska neotektonicheskikh struktur* (Fundamentals of the morphometric method for searching for neotectonic structures), Kazan: Kazanskii universitet, 2016, 53 p. (in Russian).
14. Pogorelov A. V., Dumit Zh. A., *Rel'ef basseina r. Kubani: morfologicheskii analiz* (Relief of the Kuban River Basin: Morphological Analysis), Moscow: GEOS, 2009, 220 p. (in Russian).
15. Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Mineev A. L., Chistova Z. B. (2020a), Analysis of the applicability of the ASTER GDEM v2 and ArcticDEM digital elevation models in research on Russia's Arctic territories, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 7, pp. 117–127 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127.
16. Polyakova E. V., Mineev A. L., Kutinov Yu. G., Chistova Z. B. (2020b), Assessment of the raw data of the ArcticDEM global model for studies of the northern territories of the Russian Federation, *Ural'skii geologicheskii zhurnal*, 2020, No. 5(137), pp. 3–17 (in Russian).
17. Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Mineev A. L., Chistova Z. B., Algorithm for calculating basic surfaces based on the DEM of the Arkhangelsk region for geoecological research, *Materialy 19-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 19th Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), 15–19 Nov. 2021, Moscow, 2021, p. 324 (in Russian).
18. Tregub A. I., Zhavoronkin O. V., Morphometry of the Modern Surface and Neotectonic Structure of the VKM Territory, *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Geologiya*, 2000, Vol. 9, pp. 19–26 (in Russian).
19. Filosofov V. P., *Osnovy morfometricheskogo metoda poiskov tektonicheskikh struktur* (Basics of the morphometric method for searching for tectonic structures), Saratov: Izd. Saratovskogo universiteta, 1975, 232 p. (in Russian).
20. Chernova I. Yu., Khasanov D. I., Zharkov I. Ya., Bil'danov R. R., Kashirina T. S., Detection and study of zones of the latest movements of the earth's crust using GIS tools, *ArcReview*, Moscow: Data+, 2005, No. 1(32), pp. 6–7 (in Russian).
21. Chernova I. Yu., Nugmanov I. I., Dautov A. N., Application of GIS analytic functions for improvement and development of the structural morphological methods of the neotectonics studies, *Geoinformatika*, 2010, No. 4, pp. 9–22 (in Russian).
22. Shevyrev S. L., Neotectonic uplifts and erosion of controlling structures of mnogovershinnoe gold field (Khabarovsk krai) by analysis of remote sensing data, *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Geologiya*, 2017, No. 4, pp. 72–78 (in Russian).
23. Freeman T., Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid, *Computers and Geosciences*, 1991, Vol. 17, pp. 413–422.
24. Kiss R., Determination of drainage network in digital elevation models, utilities and limitations, *J. Hungarian Geomathematics*, 2004, Vol. 2, pp. 17–29.
25. Lindsay J. B., The Terrain Analysis System: a tool for hydro-geomorphic applications, *Hydrological Processes*, 2005, Vol. 19, No. 5, pp. 1123–1130, DOI: 10.1002/hyp.5818.
26. O'Callaghan J. F., Mark D. M., The extraction of drainage networks from digital elevation data, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1984, Vol. 28(3), pp. 323–344.
27. Olaya V., Conrad O., Geomorphometry in SAGA, *Developments in Soil Science*, 2009, Vol. 33, pp. 293–308, DOI: 10.1016/S0166-2481(08)00012-3.
28. Planchon O., Darboux F., A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models, *Catena*, 2002, Vol. 46(2), pp. 159–176, DOI: 10.1016/S0341-8162(01)00164-3.
29. Quinn P., Beven K., Chevallier P., Planchon O., The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling, *Hydrological Processes*, 1991, Vol. 5(5), pp. 59–79.
30. Strahler A. N., Quantitative analysis of watershed geomorphology, *Eos, Trans. American Geophysical Union*, 1957, Vol. 38, No. 6, pp. 913–920.
31. Wang L., Liu H., An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling, *Intern. J. Geographical Information Science*, 2006, Vol. 20(2), pp. 193–213, DOI: 10.1080/13658810500433453.