

РАСЧЕТ ПЛОТНОСТИ ГИДРОСЕТИ РАВНИННЫХ АРКТИЧЕСКИХ И СУБАРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ РОССИИ ПО ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ (НА ПРИМЕРЕ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ)

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

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (Архангельск, Российская Федерация)

Для цитирования

Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б., Полякова Е. В. Расчет плотности гидросети равнинных арктических и субарктических территорий России по цифровой модели рельефа с использованием ГИС-технологий (на примере Архангельской области) // Арктика: экономика и экология. — 2024. — Т. 14, № 4. — С. 511—521. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-511-521.

Статья поступила в редакцию 30 июля 2024 г.

Для выделения малоамплитудных тектонических нарушений осадочного чехла платформенных арктических и субарктических территорий России авторами создана программа расчета плотности канальной сети современного рельефа с использованием модулей SAGA GIS. Программа позволяет автоматизировать расчет плотности гидросети, используя последовательное выполнение стандартных модулей ГИС-пакета. При расчете учитывается не только гидросеть, но и линейные понижения рельефа, что позволяет выделять структуры с повышенной активностью современной тектоники. Рассчитана плотность канальной сети репрезентативной территории (Архангельской области) с разными «окнами». Сопоставление полученных результатов с тектоническими нарушениями показало высокую степень совпадения. Предложенная методика применима для равнинных арктических и субарктических территорий России.

Ключевые слова: арктические и субарктические равнинные территории Российской Федерации, Архангельская область, геоморфометрия, цифровая модель рельефа, ГИС, плотность гидросети, тектонические нарушения.

Введение

В основе анализа поверхности современного рельефа для изучения тектоники априори лежит предположение, что все (или в подавляющем их большинстве) тектонические структуры находят отражение в поверхности современного рельефа. Анализ рельефа ранее успешно применялся в гидрологических, геоморфологических и геологических исследованиях как для картирования тектонических нарушений, так и для поиска месторождений полезных ископаемых. Но в связи с ручным выполнением расчетов по топографическим картам эти методы технически исчерпали себя и практически перестали применяться. Современные методы геоморфометрии, глобальные цифровые модели рельефа (ЦМР) открытого доступа и свободно распространяемые программные продукты (ГИС) позволили снизить трудоемкость расчетов и одновременно

повысить их точность, скорость обработки и объективность результатов и, что наиболее важно, дали возможность использовать более многовариантный морфометрический анализ без дополнительных трудозатрат. В настоящее время исследования современного рельефа переживают период возрождения. В частности, активно ведутся расчеты базисных и разностных поверхностей рельефа, которые позволяют учитывать неотектонические движения земной коры [15]. В то же время цифровые модели рельефа имеют ряд специфических особенностей, отличающих их от топографических карт и накладывающих определенные ограничения на методику геоморфометрических расчетов.

Цель исследования состоит в разработке методики расчета плотности гидросети по глобальным ЦМР равнинных арктических и субарктических территорий Российской Федерации для выделения малоамплитудных тектонических нарушений осадочного чехла платформенных регионов.

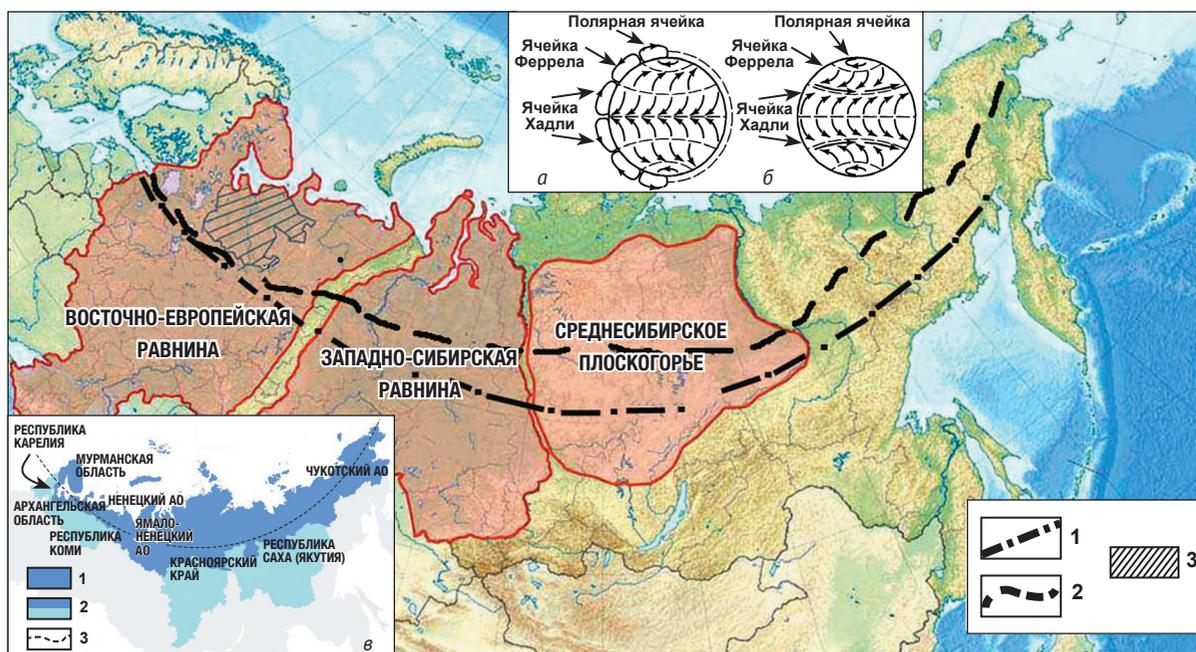


Рис. 1. Сопоставление материалов арктических и субарктических территорий России по [9] с дополнительными элементами: 1 – генерализованная граница между Полярной климатической ячейкой и ячейкой Феррела, 2 – генерализованная граница области динамического влияния Арктической зоны спрединга, 3 – территория Архангельской области. Глобальная схема ветров и атмосферные ячейки циркуляции: а – направление ветров у поверхности, б – в верхней части тропосферы, в – карта арктических регионов России (1 – регионы АЗРФ, 2 – регионы, входящие в АЗРФ частично, 3 – полярный круг)

Fig. 1. Comparison of materials of the Arctic and subarctic territories of Russia by [9] with additional elements: 1 – generalized boundary between the Polar Climatic Cell and the Ferrel Cell, 2 – generalized boundary of the dynamic influence area of the Arctic spreading zone, 3 – territory of the Arkhangelsk Region. Global wind scheme and atmospheric circulation cells: а – direction of winds at the surface, б – in the upper part of the troposphere, в – map of the Arctic regions of Russia (1 – regions of the Arctic zone of the Russian Federation, 2 – regions that are partially part of the Russian Arctic, 3 – Arctic Circle)

Выбор объекта исследований и его характеристика

В основе методологии исследований лежат два ключевых аспекта: природные особенности региона и характеристики материала, который используется для анализа. Важно учитывать, что выбор материала должен соответствовать структуре исследуемой территории.

Площадь континентальной суши Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) занимает 4,9 млн км². Ее границы на законодательном уровне определены указами Президента РФ от 2 мая 2014 г. № 296, от 27 июня 2017 г. № 287 и от 13 мая 2019 г. № 220. Учитывая размер площади АЗРФ, для разработки методики расчета плотности гидросети необходимо было выбрать регион исследования, отвечающий следующим параметрам: относительно большая площадь для возможности оперировать большими выборками данных, схожесть климатических характеристик (учет экзогенных процессов, что имеет большое значение для гидрологического режима территории), сходный современный геодинамический режим для учета современных подвижек земной коры и проявления тектонических структур в современном рельефе.

Вариантов проведения границ Арктики существует достаточно много, и они зависят от задач исследований [11]. Наиболее однозначным и простым является проведение по границам, определенным на законо-

дательном уровне. Но они, как правило, не отражают свойств природной среды,

Для изучения равнинных арктических и субарктических территорий России, занимающих три четверти площади страны, авторы выбрали континентальную территорию Архангельской области, которая в целом в геоморфологическом, климатическом, геодинамическом (она полностью входит в область динамического влияния Арктической зоны спрединга), геохимическом отношении и в характере отражения в потенциальных полях является репрезентативной для указанных выше равнинных территорий [9] (рис. 1). Это дает возможность корреспондировать с высокой степенью достоверности полученные результаты на арктические и субарктические территории всей страны. К тому же эти регионы имеют практически одинаковую геолого-геофизическую изученность как по масштабу исследований, так и по применяемым методам за исключением отдельных рудоносных районов и нефтегазоносных бассейнов.

Исследуемый регион относится к северу Русской плиты и характеризуется пассивным на нынешнем этапе типом малоамплитудной платформенной тектоники. Здесь суммарные неотектонические движения имеют небольшие амплитуды, как и изменения их скоростей и других характеристик геологического разреза и форм рельефа, отражающие современные деформации земной коры [2].

Как и всем равнинным арктическим и субарктическим территориям России, региону присущи следующие черты: 1) наличие мощного осадочного венд-палеозойского на севере и северо-востоке чехла мощностью до 3 км с моноклинальным залеганием пород (угол падения до 3°), полностью перекрытого четвертичными отложениями; 2) широкое развитие ледниковых отложений валдайского оледенения, нивелирующих дочетвертичный рельеф. В настоящее время на территории северо-запада России выделяются отложения трех ледниковых эпох в плейстоцене: миндельской (или окской) — ранний плейстоцен, рисской (днепровской с московской стадией) — средний плейстоцен, вюрмской (валдайской) — поздний плейстоцен. Отложения первых двух эпох на площади региона сохранились только в палеодолинах в отличие от отложений валдайского оледенения, сплошь покрывающих породы осадочного чехла. Для области валдайского оледенения характерны свежие формы ледникового рельефа, сформировавшие сглаженную, малоамплитудную структуру современного рельефа. Геоморфологически территория региона представляет собой пенеппенизированную равнину со слабо выраженным уклоном к Белому и Баренцеву морям. С учетом геологических и геоморфологических особенностей региона было необходимо проанализировать, как тектонические структуры отображаются в рельефе. В целом для региона характерны крупные размеры основных структурных форм, малые градиенты, скорости и амплитуды новейших и современных тектонических движений [2].

Описанное геологическое строение региона отражается в геофизических материалах. Основными геофизическими методами являлись грави- и магнитная съемки масштабов 1:200 000 и 1:50 000. Как показало физико-литологическое моделирование, основная гравимагнитная граница приурочена к кровле кристаллического фундамента, границы раздела осадочного чехла не оказывают существенного влияния на характер потенциальных полей [8]. К тому же амплитуда смещения тектонических нарушений фундамента достигает 3 км, а осадочного чехла — 10 м. Широкое распространение древесного покрова (до 65% площади региона) затрудняет дешифрирование космоматериалов. Для решения задач выделения малоамплитудных тектонических нарушений необходима разработка новых подходов. Наиболее привлекательным, по мнению авторов, является геоморфометрический анализ цифровых моделей рельефа.

В климатическом отношении северная часть региона относится к Арктическому климатическому поясу, совпадая с Полярной климатической ячейкой, а южная — к Субарктическому поясу (ячейка Феррела) (см. рис. 1а и 1б). Таким образом, теоретически эрозионные процессы в северной и южной частях региона должны протекать по-разному. Это, в свою очередь, должно отражаться на современном рельефе, включая гидросеть. Поскольку рельеф является своего рода интегральным результатом воздействия как экзогенных, так и эндогенных процессов (значительно более инерционных, чем поверхностные

процессы), появляется возможность определить значимость каждого из них для равнинных платформенных территорий Арктики и Субарктики, а также оценить область применения предложенной авторами методики расчета плотности гидросети.

Материал и методика исследований

Исследование проведено в административных границах Архангельской области кроме Ненецкого автономного округа и островных территорий (общая площадь исследований — 330 103 км²). Исходя из природных характеристик территории, для исследования авторы выбрали цифровую модель рельефа ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) GDEM (Global Digital Elevation Model) v2, имеющую следующие характеристики [7]: покрытие территории — 100% (366 780 000 ячеек), пространственное разрешение — 1 угловая секунда (~30 м), точность определения высот для 74,4% территории — 0—10 м при общем стандартном отклонении 5,62 м [13], площадь отсутствующих данных — 1,24%. Любая ЦМР независимо от утверждений разработчиков нуждается в предварительной подготовке, и ASTER GDEM не является исключением. Выбор ЦМР и методика ее подготовки достаточно подробно рассмотрены в [7; 12]. Поправки на высоту древесного покрова не вводились.

Наиболее распространенной формой анализа отражения тектонических структур в поверхности современного рельефа является сопоставление роз-диаграмм спрямленных отрезков, выделяемых по геолого-геофизическим материалам, отражающим разные уровни разреза. К ним относятся спрямленные участки гидросети, космо-фотолинеаменты, а в потенциальных полях градиентные ступени, оси линейных аномалий, линейные зоны потери корреляции и границы областей с разной морфологией поля. На первом этапе были построены розы-диаграммы потенциальных полей, отражающие структуры фундамента, гидросети, космо-фотолинеаментов и простирания склонов, пересчитанных из значений их экспозиций (Aspect) (рис. 2). Данные сглаживались отрезком 3° для исключения случайных флуктуаций, так как точность определения простираний, выделенных линеаментов составляет 1—2°. Необходимо подчеркнуть, что в рамках данного исследования авторы ограничивались рассмотрением исключительно дизъюнктивных тектонических структур, таких как разломы и зоны трещиноватости.

Анализ роз-диаграмм простирания склонов показал, что оптимальным для поверхности рельефа является окно 10×10 км, что подтверждает полученные ранее результаты обработки гидросети по топографическим материалам [8]. Этот вывод подтвержден независимыми исследованиями фактальных структур рельефа региона [17]. Кроме того, характер роз-диаграмм свидетельствует, что в структуре потенциальных полей в основном отражаются структуры северо-западного простирания, соответствующие рифейским грабенам (рис. 2а, 2б), в современном рельефе отражаются структуры

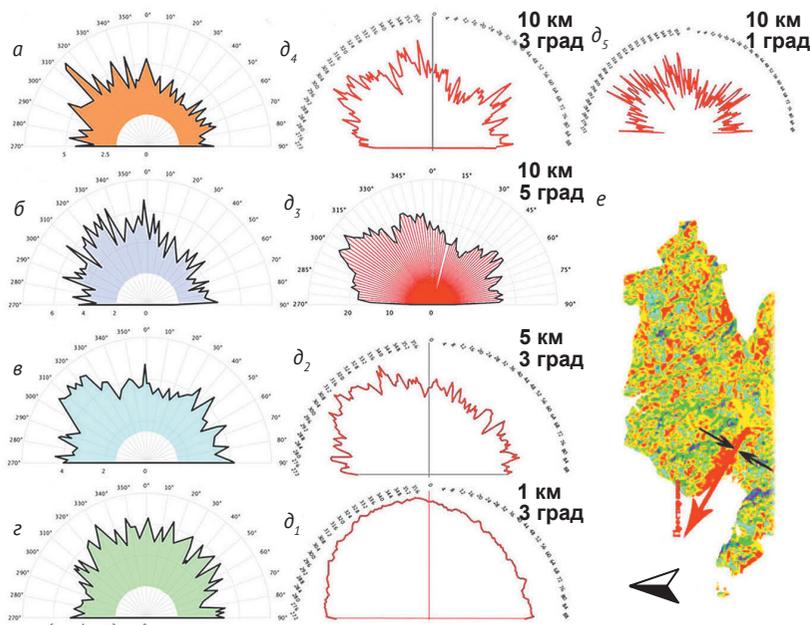


Рис. 2. Сопоставление роз-диаграмм элементов-индикаторов разломов региона (масштаб 1:200 000) с экспозицией склонов, пересчитанной в значения их простирания, по [10]: а – поля силы тяжести, б – магнитного поля, в – космофотолинеаментов, г – гидросети; d_{1-5} – розы-диаграммы (результат пересчета с разными окнами и осреднениями экспозиции склонов в простирание); е – алгоритм пересчета экспозиции склонов в простирание

Fig. 2. Comparison of rose-diagrams of fault indicator elements in the region (scale 1:200 000) with slope exposure recalculated into their strike values, according to [10]: а – gravity field, б – magnetic field, в – space photo lineaments, г – drainage networks; d_{1-5} – rose-diagrams – the result of recalculation with different windows and averaging of slope exposure into strike; е – algorithm for recalculating slope exposure into strike

не только северо-западные, но и субмеридиональные и северо-восточные (сдвиговые трансблоковые зоны) (рис. 2в, 2г, 2д₁₋₅). Связано это не только с морфокинетическими характеристиками тектонических структур, но и с физико-геологическими особенностями пород и, как следствие, характером их отражения в структуре современного рельефа.

Были построены розы-диаграммы частот встречаемости элементов-индикаторов (линеаментов) и графики азимутального распределения их средних длин, что позволило сделать вывод, что на уровне фундамента тектонические нарушения представлены структурообразующими разломами, а в осадочном чехле — зонами малоамплитудных нарушений. Несмотря на полное совпадение преобладающих простираний на розах-диаграммах (см. рис. 1), можно говорить только о совпадении простираний. Поэтому для анализа пространственных закономерностей по авторской методике [16] были рассчитаны отражения структур фундамента в современной рельефе. Прямой характер (выступ-выступ, впадина-впадина) наследования имеет 61% территории, обратный (впадина-выступ и выступ-впадина) — 25%, на 14% территории совпадения не наблюдаются. Таким образом, наблюдается не только совпадение простираний, но и контуров структур.

Анализ азимутального распределения элементов-индикаторов разломов показал, что одни и те же на-

правления имеют максимальное представительство на космоснимках, в геоморфологических материалах (рис. 2в, 2г, 2д), отражающих неотектонические подвижки земной коры, и в потенциальных полях (рис. 2а, 2б), фиксирующих строение кристаллического фундамента [8]. Поскольку разрывные нарушения проявляют себя как устойчивые структуры, отражаясь в строении фундамента, осадочного чехла и на дневной поверхности, был произведен расчет плотности гидрографической сети. При анализе ЦМР для оценки современных движений земной коры наиболее широкое распространение получили расчеты базисных и разностных поверхностей. Расчеты плотности гидросети применяются в единичных случаях и, как правило, представляют собой попытки прямого переноса методов обработки топографических материалов на данные ЦМР [4] без учета их особенностей.

Отличие глобальных ЦМР из космоса от ЦМР по топографическим материалам состоит в отсутствии на них гидросети в «прямом» виде. То есть необходимо было построить речную сеть. Анализ начинается с автоматического выявления цепочек пикселей, относящихся к понижениям рельефа линейной формы. Таким образом, с помощью ЦМР можно построить только канальную сеть, т. е. сеть протяженных понижений рельефа, включая современную гидросеть.

Наиболее распространенными методами выделения гидросети являются два алгоритма — D8 (Deterministic Eight Neighbor) и MFD (Multiple Flow Direction) (рис. 3). Их достоинства и недостатки рассмотрены в [6]. Авторами был выбран метод MFD, так как в нем учитывается эффект расхождения потоков [20; 22], т. е. сток воды из рассматриваемой ячейки происходит не только в самую низкую ячейку, но во все ячейки окружения, которые ниже рассматриваемой.

Но «средняя суммарная длина хребтов и долин (совместно) линейно растет при изменении масштаба анализа (при росте разрешения)» [3, с. 27]. Чтобы канальную сеть приблизить к речной сети, необходимо отбраковать каналы, о которых с очевидностью можно сказать, что они либо не участвуют в формировании речной сети, либо играют незначительную роль. В цифровом моделировании для решения этой проблемы используются грид инициализации и пороговое значение.

В качестве грида инициализации может быть использован порядок Стралера [23], а в качестве

порогового значения может быть выбран порядок гидросети. В [19] было предложено использовать порядки 5-й и выше, так как, по мнению авторов указанной работы, водотоки 1—4-го порядков относятся к временным. Следует отметить, что этот критерий зависит от природных условий региона. Его применение требует достаточно детального изучения гидросети. Нами в качестве начального значения использовался грид водосборной площади — величины, характеризующей территорию, с которой осуществляется сток в ячейку ЦМР. В качестве порогового значения была выбрана площадь 100 км². Таким образом, была получена речная сеть, в формировании которой участвуют каналы, водосборный бассейн которых превышает 100 км². То есть учитывались водотоки протяженностью 10 км, а наличие сформировавшегося водосборного бассейна позволило исключить из расчетов временные водотоки.

Далее полученная речная сеть разбивалась на квадраты 10×10 км. В каждом квадрате рассчитывалась сумма длин водотоков, и эта сумма была нормирована на площадь квадрата, чтобы получить значение плотности.

Поскольку растровая основа ЦМР позволяет плавно менять масштаб, реализуя таким образом процесс естественной генерализации понижений рельефа (водотоков) [3], был применен метод ресамплинга (изменение пространственного разрешения, либо увеличение, либо уменьшение). Ресамплинг позволил, во-первых, вернуться от разрешения 10 км в ячейке к исходному разрешению ЦМР в 1 км, а во-вторых, получить более контрастные границы зон плотности за счет естественной генерализации данных цифровой модели рельефа, так как обычное осреднение в «окне» приводит к искажению значений высотных отметок [7].

Алгоритм расчета средствами SAGA GIS (System for Automated Geoscientific Analysis) состоял из 8 последовательно реализуемых этапов (модулей SAGA GIS) от выделения водосборных бассейнов до расчета плотности гидросети (табл. 1).

Конкретный пример работы описанного алгоритма приведен на рис. 4.

Обсуждение результатов

Создана программа расчета плотности канальной сети современного рельефа с использованием модулей SAGA GIS, позволя-

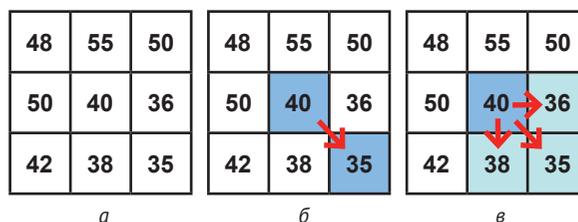


Рис. 3. Распределение движения потока по ЦМР (а) в алгоритме D8 (б) и MFD (в) (цифрами обозначены условные значения высот, м), по [21]

Fig. 3. Distribution of flow motion by DEM (a) in the D8 (b) and MFD (v) algorithm (the numbers are conventional values of altitude, m), according to [21]

ющая автоматизировать расчет плотности гидросети. Расчет плотности гидросети (отношение совокупной длины всех водотоков на исследуемом участке к площади этого участка, единица измерения — м/м²) не существует в SAGA GIS в виде отдельного готового модуля. Однако рассчитать этот показатель можно, воспользовавшись последовательным выполнением стандартных модулей ГИС-пакета, что и было реализовано в данном исследовании. Последовательность

Таблица 1. Алгоритм расчета плотности гидросети средствами SAGA GIS [10]

Table 1. Algorithm for calculating the density of the drainage network using SAGA GIS [10]

Модуль	Ключевые параметры модуля и комментарий
Terrain Analysis → Channels → Channel Network	Elevation = ЦМР Initiation Grid = водосборная площадь Initiation Type = Greater than Initiation Threshold = минимальная водосборная площадь водотока Из ЦМР выделяется речная сеть в виде векторного слоя полилиний. В результате работы модуля будут выделены водотоки, имеющие водосборную площадь, большую указанной минимальной
Grid → Grid System → Resampling	Grid = ЦМР Target Grid System = user defined Cellsize = размер окна Выбирается размер окна, в котором будут производиться дальнейшие расчеты. В результате работы модуля получится растровый слой ЦМР с разрешением, равным выбранному размеру окна
Shapes → Grid → Vectorization → Grid Values To Points	Grids = слой, полученный на предыдущем этапе Type = cells Подготавливается векторный слой полигонов, покрывающих ЦМР. Размер одного полигона равен размеру выбранного окна. То есть исследуемая область разбивается на окна одного размера
Shapes → Lines → LinePolygon Intersection	Lines = слой речной сети Polygons = слой, полученный на предыдущем этапе Output = one multi-line per polygon Подготавливается векторный слой полилиний. Каждая полилиния этого слоя соответствует водотокам, приходящимся на каждое окно

Окончание табл. 1

Модуль	Ключевые параметры модуля и комментарий
Shapes → Lines → Line Properties	<i>Lines</i> = слой, полученный на предыдущем этапе <i>Options</i> = Length Для каждой полилинии слоя, полученного на предыдущем этапе, высчитывается ее длина. Таким образом высчитываются длины водотоков в каждом окне
Grid → Gridding → Shapes To Grid	<i>Shapes</i> = слой, полученный на предыдущем этапе <i>Attribute</i> = LENGTH <i>Target Grid System</i> = grid or grid system <i>Target Grid</i> = слой, полученный на 2-м этапе Подготавливается растровый слой, каждая ячейка которого содержит длину водотоков, приходящихся на эту ячейку. Разрешение раstra равняется выбранному размеру окна
Grid → Calculus → Grid Calculator	<i>Grids</i> = слой, полученный на предыдущем этапе <i>Formula</i> = $g1 / [\text{площадь окна}]$ Для каждой ячейки слоя, полученного на предыдущем этапе, высчитывается плотность гидросети. Размер ячейки равен выбранному размеру окна
Grid → Grid System → Resampling	<i>Grid</i> = слой, полученный на предыдущем этапе <i>Target Grid System</i> = растровая система ЦМР <i>Interpolation Method</i> = метод интерполяции, например, B-Spline Подготавливается растровый слой, имеющий разрешение ЦМР, в котором каждая ячейка содержит интерполированное значение плотности гидросети, рассчитанной в выбранном окне

реализации модулей для расчета плотности гидросети и их описание приведены в табл. 1. При этом учитывается не только гидросеть, но и линейные понижения рельефа, что позволяет выделять площадные структуры с повышенной активностью современной тектоники. С помощью этого алгоритма авторами была рассчитана плотность канальной сети Архангельской области в «окне» размером 10×10 км (рис. 5).

Сопоставление полученных материалов с тектоническими структурами региона показало пространственное совпадение зон повышенной плотности гидросети (0,12—0,16 км/км²) с основными структурами фундамента, что говорит об их наследовании в осадочном чехле и современном рельефе. Причем отчетливо выделяются структуры 1-го порядка, как северо-западного и северо-восточного простирания, так субмеридиональные.

На более детальном уровне это видно еще отчетливее (рис. 6). Следует отметить, что расчет плотности гидросети в «окне» 1×1 км (см. рис. 6а) малоинформативен. Размер «окна» был выбран на основе выводов исследования региона [16], согласно которым минимальный размер структурных элементов рельефа, связанных с тектоническими нарушениями, составляет примерно 1 км. При применении окна 5×5 км (см. рис. 6б) совпадение с тектоническими нарушениями фундамента [18] позволяет говорить об эффективности предложенного подхода даже при сопоставлении с мелко-масштабными материалами (масштаб 1:1 500 000).

Более подробный анализ как результатов расчетов в «окне» 5×5 км (рис. 6а), так и 10×10 км (см. рис. 5) свидетельствует о разном характере отражения разломов фундамента в значениях плотности линейных понижений рельефа. Структуры северо-западного простирания характеризуются параллельным расположением по отношению к зонам максимальных значений плотности, а северо-восточные — цепочками изоли-

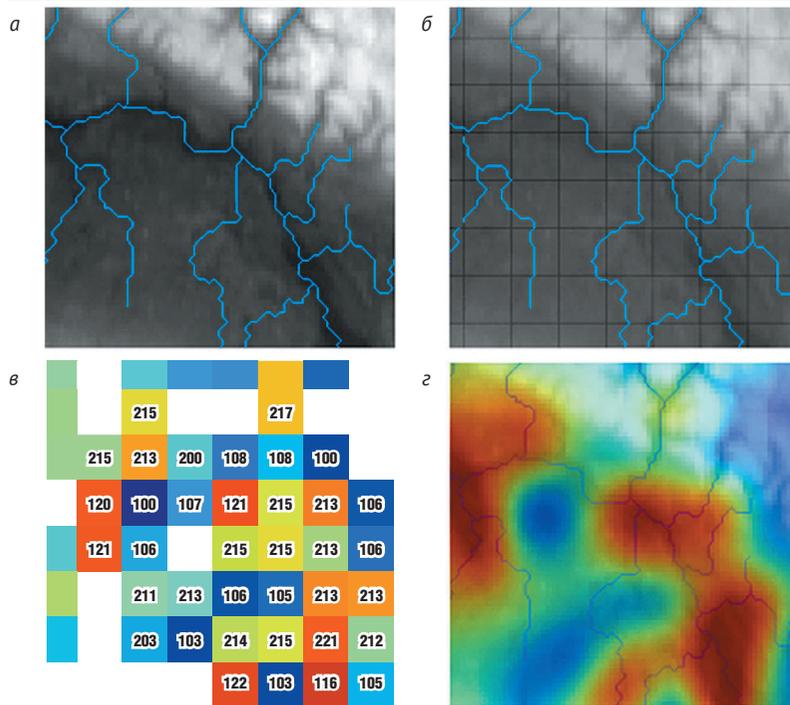


Рис. 4. Демонстрация работы алгоритма расчета плотности гидросети в заданном «окне» средствами SAGA GIS: а – речная сеть, б – речная сеть разбита на «окна» заданного размера, в – в каждом «окне» рассчитана плотность сети, г – плотность сети интерполирована на ЦМР
Fig. 4. Demonstration of the algorithm for calculating the density of the drainage network in a given “window” by means of SAGA GIS: а – river network, б – the river network is divided into “windows” of a given size, в – the network density is calculated in each “window”, г – the network density is interpolated onto the DEM

Рис. 5. Плотность гидросети территории Архангельской области, рассчитанная в «окне» 10×10 км
 Fig. 5. Density of the drainage network of the Arkhangelsk Region, calculated in the "window" of 10×10 km

рованных аномалий. Такое различие связано с морфокинематикой анализируемых структур. Структуры северо-западного простирания представлены глубинными структурообразующими разломами сбросового типа с углами падения в докембрийском фундаменте от 35—45° до 75—85° [1]. Осредненные углы падения сместителей северо-западных структур в теле фундамента показаны на разрезе по профилю ГСЗ (см. рис. 6в). В этом случае смещение малоамплитудных зон тектонических нарушений в первом приближении можно рассчитать как катет b по формуле

$$b = l / \operatorname{tga},$$

где l — мощность осадочного чехла; a — угол падения.

В зависимости от угла падения смещение пространственного положения разлома (зоны трещиноватости) в современном рельефе может быть значительным и превышать мощность осадочного чехла. Например, при углах падения от 35° до 45° смещение больше, чем мощность осадочного слоя, который в среднем составляет 2000 м (см. табл. 2).

Авторы сознают, что полученные результаты являются предварительными и представляют собой лишь средние значения углов падения тектонических нарушений. В реальной геологической слоистой среде тектонические нарушения имеют ступенчатое строение, их угол падения меняется в зависимости от физических свойств пород, слагающих слои [10]. Вопрос этот требует дальнейшего изучения. Тем не менее можно приблизительно оценить средний угол наклона тектонической структуры в осадочном чехле, основываясь на величине смещения. Это позволит определить положение тектонической структуры на разных уровнях осадочного чехла. Сопоставляя величину смещения с положением проекции разлома на поверхность современного рельефа, можно сделать вывод, насколько изменился (или не изменился) угол падения тектонической структуры в осадочном чехле. Такие выводы достаточно важны для равнинных платформенных территорий, так как в большинстве случаев углы падения структур в осадочном чехле определяются только на локальных участках.

Иначе выглядит ситуация со структурами северо-восточного простирания, слагающими Балтийско-Мезенскую трансблоковую структуру [10]. Они выделяются цепочками аномалий повышенной плотности гидросети, приуроченными к их пересечению с северо-западными структурами.

Детальные исследования показали, что «...Балтийско-Мезенская зона в фанерозое развивалась преимущественно в обстановке праводвиговой транспрессии в результате проявления восьми стадий активизации во время каледонского, герцинского и новейшего этапов деформаций. Отмечена динамическая связь геолого-структурных и геоморфологи-

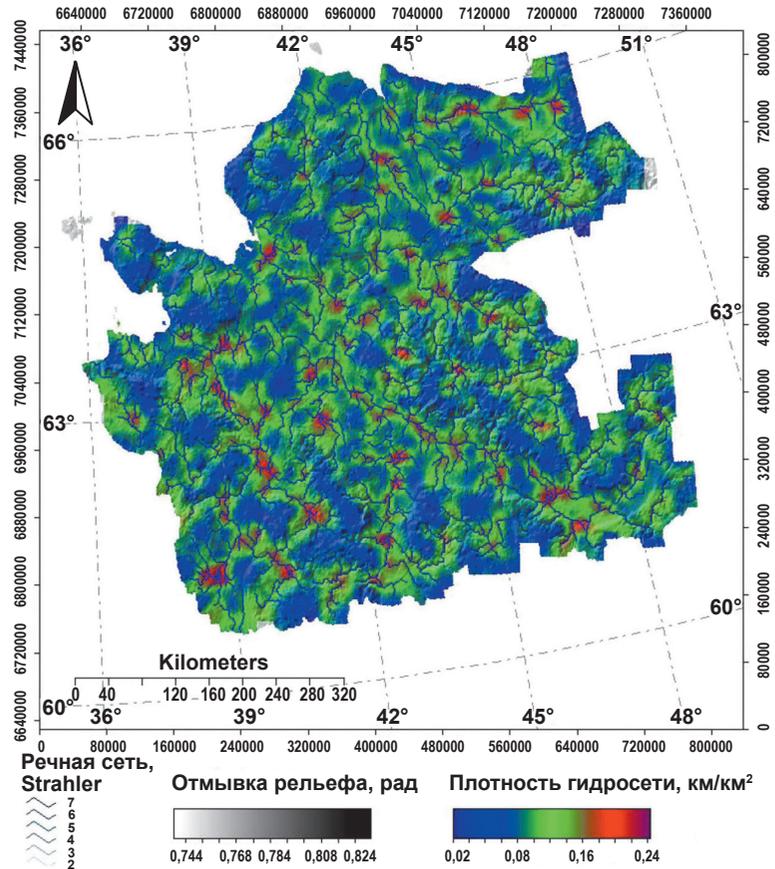


Таблица 2. Смещение тектонических структур на поверхности рельефа от их положения в кровле фундамента при разных углах падения сместителя

Table 2. Displacement of tectonic structures on the relief surface from their position in the basement roof at different angles of displacement

Угол падения, град.	Величина смещения, м
35	2856
40	2384
45	2000
50	1678
55	1400
60	1154
65	933
70	728
75	536
80	353
85	175

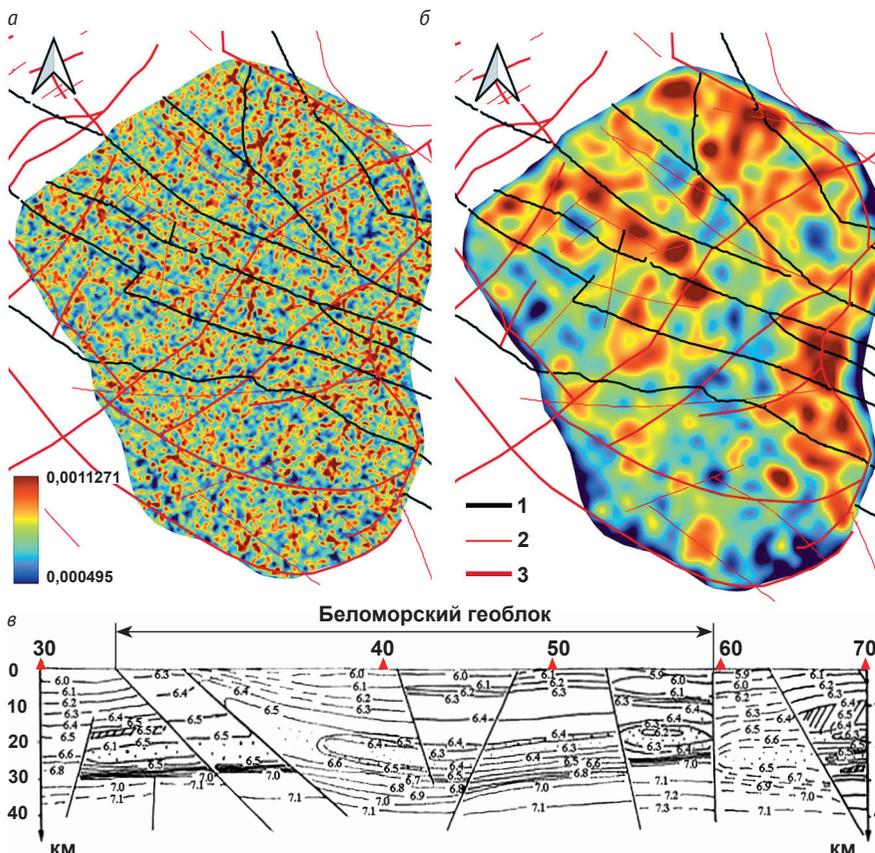


Рис. 6. Сопоставление плотности гидросети (по [14]) площади Беломоро-Кулойского плато в «окне» 1×1 км (а) и «окне» 5×5 км (б) с тектоническими нарушениями [18]. Шкала значений плотности гидросети дана в м/м².

Разломы:
1 – сбросы,
2 – с неустановленной кинематикой,
3 – активированные с неустановленной кинематикой.

Фрагмент в – часть профиля ГСЗ [8]

Fig. 6. Comparison of the density of the drainage network (according to [14]) of the area of the Belomoro-Kuloi plateau in the “window” of 1×1 km (a) and the “window” of 5×5 km (b) with tectonic disturbances [17]. The scale of drainage-network density values is given in m/m².

Tectonic faults: 1 – faults, 2 – with undetermined kinematics, 3 – activated with undetermined kinematics. Fragment v is a part of the profile [8]

ческих аномалий Балтийско-Мезенской зоны с сегментами изгиба ее магистрали и виргации, а также с узлами пересечения главного нарушения с поперечными разрывами» [5, с. 48]. Таким образом, результаты исследования согласуются с выводами, полученными в ходе независимых исследований структурно-кинематических парагенезов Балтийско-Мезенской зоны на прилегающей территории [5].

Исходя из вышеизложенного, по характеру взаимного расположения аномалий повышенных значений плотности гидросети можно оценить морфокинематику структур (сброс или сдвиг).

Сопоставление полученных результатов для северных и южных районов региона (арктических и субарктических территорий) показало отсутствие принципиальных отличий между ними в плотности гидросети. Эти результаты подтверждаются данными расчета таких геоморфометрических параметров, как индекс расчлененности, потенциальная энергия рельефа [10], характер базисных и разностных поверхностей рельефа [9; 10; 15]. То есть доминирующее значение для формирования поверхности рельефа играют современные подвижки земной коры (эндогенный фактор), роль экзогенных факторов сводится к нивелированию результатов этих подвижек путем формирования денудационных поверхностей выравнивания.

Выводы

В ходе исследования была разработана автоматизированная экспресс-методика выделения малоамплитудных тектонических нарушений осадочного

чехла платформенных арктических и субарктических территорий. Создана программа расчета плотности канальной сети современного рельефа с использованием модулей SAGA GIS. Сопоставление полученных результатов с тектоническими структурами кристаллического фундамента показало высокую степень их пространственного совпадения, что подтверждает корректность расчетов. Полученные результаты позволяют рассчитать углы падения тектонических структур в осадочном чехле и оценить их морфокинематику. Предложенная методика применима для равнинных арктических и субарктических территорий России.

Финансирование

Исследования проведены за счет государственного задания ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова» Уральского отделения РАН, проект «Геоэкологическая оценка состояния природной среды арктических и приарктических территорий РФ средствами цифрового моделирования рельефа на примере севера Русской плиты», номер государственной регистрации 122011300380-5.

Литература/References

1. Билибина Т. В. Блоковая тектоника и геодинамика земной коры северо-запада Русской платформы и принципы прогнозирования рудоносных структур // Блоковая тектоника и перспективы рудоносности Русской платформы. — Л.: ВСЕГЕИ, 1986. — С. 22—29.

- Bilibina T. V.* Block tectonics and geodynamics of the earth's crust of the north-west of the Russian platform and the principles of forecasting ore-bearing structures. Block tectonics and ore prospects of the Russian Platform. Leningrad, VSEGEI, 1986, pp. 22—29. (In Russian).
2. Григорьева С. В., Макаров В. И. Крупномасштабное картографирование новейшей тектоники платформенных территорий (на примере Москвы) // Геоэкология, инженер. геология, гидрогеология, геоэкология. — 2010. — № 2. — С. 99—114.
- Grigor'eva S. V., Makarov V. I.* Large-scale neotectonic mapping of platform areas (by the example of Moscow). *Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya* [Geoecology, Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology], 2010, no. 3, pp. 99—114. (In Russian).
3. Златопольский А. А. Мультимасштабный анализ цифровой модели рельефа. Экспериментальные закономерности // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2015. — Т. 12, № 3. — С. 27—35.
- Zlatopol'sky A. A.* Multiscale digital terrain map analysis. Experimental regularities. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from Space], 2015, vol. 12, no. 3, pp. 27—35. (In Russian).
4. Иванченко Г. Н., Тубанов Ц. А. Геодинамическое районирование западного Забайкалья методами компьютерного линейного анализа цифровой модели рельефа // Динам. процессы в геосферах. — 2023. — Т. 15, № 3. — С. 1—22. — DOI: 10.26006/29490995_2023_15_3_.
- Ivanchenko G. N., Tubanov Ts. A.* Geodynamic zoning of Western Transbaikalia using computer lineament analysis of the digital elevation model. *Dinamicheskie processy v geosferakh* [Dynamic processes in geosphere], 2023, vol. 15, no. 3, pp. 1—22. DOI: 10.26006/29490995_2023_15_3_. (In Russian).
5. Колодяжный С. Ю., Терехов Е. Н., Балуев А. С. Структурно-кинематические парагенезы и динамическая модель эволюции Балтийско-Мезенской зоны в фанерозое, северо-запад Восточно-Европейской платформы // Геотектоника. — 2020. — № 2. — С. 48—74. — DOI: 10.31857/S0016853X20020071.
- Kolodyazhny S. Yu., Terekhov E. N., Baluev A. S.* Structural-Kinematic Parageneses and Dynamic Evolution Model of the Baltic-Mezen Shear Zone in the Phanerozoic, the Northern-Western Part of the European Platform. *Geotektonika* [Geotectonics], 2020, no. 2, pp. 48—74. DOI: 10.31857/S0016853X20020071. (In Russian).
6. Кошель С. М., Энтин А. Л. Вычисление площади водосбора по цифровым моделям рельефа на основе построения линий тока // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. — 2017. — № 3. — С. 42—50.
- Koshel' S. M., Entin A. L.* Evaluating drainage area by digital elevation models based on flow line construction. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geografiya* [Bulletin of the Moscow University. Ser. 5. Geography], 2017, no. 3, pp. 42—50. (In Russian).
7. Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Полякова Е. В., Чистова З. Б. Выбор базовой цифровой модели рельефа (ЦМР) равнинных территорий Севера Евразии и ее подготовка для геоэкологического районирования (на примере Архангельской области). — Пенза: Социосфера, 2019. — 176 с.
- Kutinov Yu. G., Mineev A. L., Polyakova E. V., Chistova Z. B.* 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, 176 p. (In Russian).
8. Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б. Иерархический ряд проявлений щелочно-ультраосновного магматизма Архангельской алмазоносной провинции. Их отражение в геолого-геофизических материалах. — Архангельск: ОАО «ИПП «Правда Севера», 2004. — 283 с.
- Kutinov Yu. G., Chistova Z. B.* A hierarchical series of manifestations of kimberlite magmatism of the Arkhangelsk diamondiferous province. Their reflection in geological and geophysical materials. Arkhangelsk, ОАО «IPP Pravda Severa», 2004, 284 p. (In Russian).
9. Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б., Минеев А. Л. и др. Результаты мониторинговых исследований процессов межгеосферного взаимодействия в тектонических узлах севера Русской плиты // Динам. процессы в геосферах. — 2022. — Т. 14, № 2. — С. 10—24. — DOI: 10.26006/29490995_2022_14_2_10.
- Kutinov Yu. G., Chistova Z. B., Mineev A. L., Polyakova E. V., Neverov N. A.* Results of monitoring studies of the processes of intergeospheric interaction in the tectonic nodes of the north of the Russian Plate. *Dinamicheskie processy v geosferakh* [Dynamic processes in geosphere], 2022, vol. 14, no. 2, pp. 10—24. DOI: 10.26006/29490995_2022_14_2_10. (In Russian).
10. Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б., Полякова Е. В., Минеев А. Л. Применение цифровых моделей рельефа (ЦМР) для выделения тектонических структур древних платформ (на примере северо-запада Русской плиты). — Пенза: Науч.-изд. центр «Социосфера», 2020. — 378 с.
- Kutinov Yu. G., Chistova Z. B., Polyakova E. V., Mineev A. L.* The use of digital elevation models (DEM) to identify tectonic structures of ancient platforms (on the example of the north-west of the Russian plate). Penza, Sotsiosfera, 2020, 378 p. (In Russian).
11. Кутинов Ю. Г. Экогеодинамика Арктического сегмента земной коры. — Екатеринбург: УрО РАН, 2005. — 388 с.
- Kutinov Yu. G.* Eco-Geodynamics of the Arctic segment of the Earth's crust. Ekaterinburg, UB RAS, 2005, 388 p. (In Russian).
12. Минеев А. Л., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б., Полякова Е. В. Подготовка цифровой модели рельефа для исследования экзогенных процессов северных территорий Российской Федерации // Пространство и Время. — 2015. — № 3 (21). — С. 278—291.
- Mineev A. L., Kutinov Yu. G., Chistova Z. B., Polyakova E. V.* Preparation of a digital elevation model for the study of exogenous processes in the northern territories of

the Russian Federation. *Prostranstvo i Vremya* [Space and Time], 2015, no. 3 (21), pp. 278—291. (In Russian).
13. *Минеев А. Л., Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б.* Надежность цифровой модели рельефа Архангельской области для проведения геоэкологических исследований // *Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. — 2018. — Т. 15, № 4. — С. 58—67. — DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-58-67.

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* [Modern problems of remote sensing of the Earth from Space], 2018, vol. 15, no. 4, pp. 58—67. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-58-67. (In Russian).

14. *Полякова Е. В.* Геоэкологический анализ территории Севера Русской плиты средствами цифрового моделирования рельефа: возможности и практическое применение: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минер. наук. — М.: ИГЭ РАН, 2022. — 38 с.

Polyakova E. V. Geoecological Analysis of the Territory of the North of the Russian Plate by Means of Digital Relief Modeling: Possibilities and Practical Application. [Abstract for the Article. Uch. Doctorate Geol-Miner. Sciences]. Moscow, IGE RAS, 2022, 38 p. (In Russian).

15. *Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б.* Алгоритм расчета базисных поверхностей на основе цифровой модели рельефа в программном обеспечении SAGA GIS (на примере Архангельской области) // *Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. — 2023. — Т. 20, № 3. — С. 104—115. — DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-104-115.

Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Mineev A. L., Chistova Z. B. An algorithm for calculating basic surfaces based on a digital elevation model in SAGA GIS software: case study of Arkhangelsk region. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. [Modern problems of remote sensing of the Earth from Space], 2023, vol. 20, no. 3, pp. 104—115. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-104-115. (In Russian).

16. *Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б.* Опыт применения цифрового моделирования для выявления наследования структур фундамента в современном рельефе севера Русской плиты // *Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. — 2019. — Т. 16, № 2. — С. 75—83. — DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-75-83.

Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Chistova Z. B., Mineev A. L. Experience of digital elevation modeling for the identification of inheritance of foundation structures in modern relief of the northern part of Russian Plate. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. [Modern problems of remote sensing of the Earth from Space], 2019, vol. 16, no. 2, pp. 75—83. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-75-83. (In Russian).

17. *Сергеев И. С., Егоров И. В.* Структурная геоморфология Беломорского региона на основе фрактальной геометрии в среде ГИС // *Изв. Рус. геогр. о-ва*. — 2015. — Т. 147, вып. 4. — С. 24—38.

Sergeev I. S., Egorov I. V. Structural Geomorphology of the White Sea Region Based on Fractal Geometry in a GIS. *Izvestiya Russkogo Geograficheskogo Obshchestva* [Proceedings of the Russian Geographical Society], 2015, vol. 147, no. 4, pp. 24—38. (In Russian).

18. Тектоническая карта Белого моря и прилегающих территорий: Масштаб 1:1 500 000 / Под ред. М. Г. Леонова, Г. С. Казанина. — М.: ГИН РАН, 2010.

Tectonic map of the White Sea and adjacent territories. Scale 1:1 500 000. Ed. by G. S. Kazanin. Moscow, GIN RAS, 2010. (In Russian).

19. *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.

Chernova I. Yu., Nugmanov I. I., Dautov A. N. Application of analytical functions of GIS for improvement and development of structural and morphological methods of studying neotectonics. *Geoinformatika* [Geoinformatics], 2010, no. 4, pp. 9—22. (In Russian).

20. *Freeman T.* Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computers and Geosciences*, 1991, vol. 17, pp. 413—422.

21. *Mineev A. L., Kutinov Yu. G., Polyakova E. V., Chistova Z. B., Staritsyn V. V.* An Algorithm for Constructing a Network of Valleys Using GIS and DEM: Case Study of Arkhangelsk Oblast. *Water Resources*, 2023, vol. 50, no. 8, pp. 1200—1203. DOI: 10.1134/S0097807823700604.

22. *Quinn P., Beven K., Chevallier P., Planchon O.* The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling. *Hydrological Processes*, 1991, vol. 5 (5), pp. 59—79.

23. *Strahler A. N.* Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1957, vol. 38, no. 6, pp. 913—920.

Информация об авторах

Кутинов Юрий Григорьевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (163020, Россия, Архангельск, Никольский просп., д. 20), e-mail: kutinov@fciactic.ru.

Минеев Александр Леонидович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (163020, Россия, Архангельск, Никольский просп., д. 20).

Чистова Зинаида Борисовна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (163020, Россия, Архангельск, Никольский просп., д. 20).

Полякова Елена Викторовна, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (163020, Россия, Архангельск, Никольский просп., д. 20).

DENSITY CALCULATION OF THE HYDRO-NETWORK OF THE ARCTIC AND SUBARCTIC PLAIN TERRITORIES OF THE RUSSIAN FEDERATION BASED ON A DIGITAL ELEVATION MODEL USING GIS TECHNOLOGIES (CASE STUDY OF THE ARKHANGELSK REGION)

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

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russian Federation)

The article was received on July 30, 2024

For citing

Kutinov Yu. G., Mineev A. L., Chistova Z. B., Polyakova E. V. Density Calculation of the Hydro-network of the Arctic and Subarctic Plain Territories of the Russian Federation Based on a Digital Elevation Model Using GIS Technologies (Case Study of the Arkhangelsk Region). *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 4, pp. 511—521. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-511-521. (In Russian).

Abstract

The authors have developed a program for calculating the density of the channel network of the current relief using SAGA GIS modules to identify low-amplitude tectonic disturbances in the sedimentary cover of the platform arctic and subarctic territories of the Russian Federation. The program allows automating the calculation of the drainage network density using the sequential execution of standard GIS package modules. The calculation takes into account not only the drainage network, but also linear depressions of the relief, which makes it possible to identify structures with increased activity of current tectonics. The authors have calculated the density of the channel network of the representative territory (Arkhangelsk Region) with different “windows”. Comparison of the results with tectonic disturbances have shown a high degree of coincidence. The proposed methodology is applicable to the plain arctic and subarctic territories of the Russian Federation.

Keywords: *Arctic and Subarctic plain territories of the Russian Federation, Arkhangelsk Region, Geomorphometry, Digital Elevation Model, GIS, hydro-network density, tectonic disturbances.*

Funding

The study was funded by state assignment of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, the project “Geoecological assessment of the state of the natural environment of the Arctic and subarctic territories of the Russian Federation by means of digital elevation simulation using the example of the north of the Russian Plate”, the state registration number 122011300380-5.

Information about the authors

Kutinov, Yury Grigorievich, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Scientific Leader, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, Nikolsky Ave., Arkhangelsk, Russia, 163020), e-mail: kutinov@fciarctic.ru.

Mineev, Alexandr Leonidovich, PhD of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Research Fellow, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, Nikolsky Ave., Arkhangelsk, Russia, 163020).

Chistova, Zinaida Borisovna, PhD of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, Nikolsky Ave., Arkhangelsk, Russia, 163020).

Polyakova, Elena Viktorovna, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, Nikolsky Ave., Arkhangelsk, Russia, 163020).

@ Kutinov Yu. G., Mineev A. L., Chistova Z. B., Polyakova E. V., 2024