

Методология анализа состояния природной среды равнинных территорий арктической зоны Российской Федерации*

Ю.Г. Кутинов, З.Б. Чистова, Е.В. Полякова, А.Л. Минеев, Т.Я. Беленович, Н.А. Неверов

Цель исследования – разработка методики комплексного геоэкологического районирования равнинных территорий арктической зоны Российской Федерации на основе цифровых моделей рельефа. Для учета: а) экзогенных факторов были рассчитаны геоморфометрические параметры рельефа; б) эндогенных факторов – коэффициент дискретности и энергоёмкости, плотность разломов и функция дробления земной коры. Такой комплексный подход не имеет аналогов и позволяет учесть влияние на состояние окружающей среды экзогенных и эндогенных, климатических и других природных факторов на глобальном, региональном и локальном уровнях. В результате была разработана методика комплексного геоэкологического районирования северных равнинных территорий России на основе современных цифровых моделей рельефа с использованием ГИС-технологий и созданы карты геоэкологического районирования.

Ключевые слова: арктическая зона России, цифровая модель рельефа, эндогенные и экзогенные процессы, методика геоэкологического районирования.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-05-60024) и федеральных бюджетных ассигнований (государственное задание №122011300380-5).

Введение

Комплексные исследования, посвященные геоэкологическому районированию крупных таксонов Земли, практически отсутствуют. Обычно районирование проводится для отдельных компонентов окружающей среды, природных и техногенных опасностей, рисков чрезвычайных ситуаций и т. п. Работы имеют разрозненный характер, отсутствуют научно-методологическая и концептуальная основы геоэкологического районирования. Комплексность изучения, реализованная в данном исследовании, основана на определении сути земной поверхности как объединяющей все компоненты этой поверхности, в совокупности составляющие природную среду. Земная поверхность рассматривалась как результат последовательного сложения геологических структур, закономерно преобразованных

комплексом экзогенных процессов и соответствующим образом проявленных в рельефе. То есть земная поверхность выступает, во-первых, как категория историческая и, во-вторых, как результат взаимодействия литосферы (эндогенных процессов) с гидросферой, атмосферой, биосферой и источниками внешнего воздействия (экзогенными или внешними процессами). Сходный подход предлагался рядом авторов для оценки интенсивности проявления современных геологических процессов и геологических опасностей освоения территории [1]. Однако в предложенной в этом исследовании методике рассматри-



КУТИНОВ
Юрий Григорьевич
Федеральный
исследовательский центр
комплексного изучения Арктики
им. академика Н.П. Лаверова
УрО РАН



ЧИСТОВА
Зинаида Борисовна
Федеральный
исследовательский центр
комплексного изучения Арктики
им. академика Н.П. Лаверова
УрО РАН



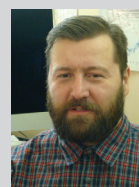
ПОЛЯКОВА
Елена Викторовна
Федеральный
исследовательский центр
комплексного изучения Арктики
им. академика Н.П. Лаверова
УрО РАН



МИНЕЕВ
Александр Леонидович
Федеральный
исследовательский центр
комплексного изучения Арктики
им. академика Н.П. Лаверова
УрО РАН



БЕЛЕНОВИЧ
Таисия Яковлевна
Федеральный
исследовательский центр
комплексного изучения Арктики
им. академика Н.П. Лаверова
УрО РАН



НЕВЕРОВ
Николай Александрович
Федеральный
исследовательский центр
комплексного изучения Арктики
им. академика Н.П. Лаверова
УрО РАН

ваются экзогенные и эндогенные процессы раздельно (как не связанные между собой), и не учитывает биогенные и метеофакторы. К тому же она требует равномерной сети и достаточно многочисленных данных наблюдения, что трудно соблюсти на глобальном и региональном уровнях.

Методика исследований

Для разработки методики геоэкологического районирования было необходимо выбрать репрезентативный и обширный регион. Нами была выбрана территория Архангельской области, поскольку она входит в состав Русской равнины, имеющей сходные геоморфологические параметры с Западно-Сибирской равниной [2] и Среднесибирским

плоскогорьем, занимающими более двух третей территории России (рис. 1а).

Несмотря на разное геологическое строение, все арктические и приарктические территории России относятся к единой области динамического влияния арктической зоны спрединга (рис. 1б, с) и характеризуются схожими геодинамическими режимами [3]. Архангельская область с учетом ее характеристик (площади – 2.4% общей территории России без Ненецкого автономного округа, протяженности, природных богатств, климатических особенностей и ряда других факторов) является уникальной территорией Российской Федерации [4]. Она охватывает практически все основные геолого-географические и биоклиматические типы природных комплексов от типичной тундры до типичных ландшафтов средней полосы, что позволяет проводить широкомасштабные сопоставительные исследования, результаты которых могут быть распространены на бо́льшую часть территории России.

Для проведения геоэкологических исследований нами разработан алгоритм, состоящий из трех вза-

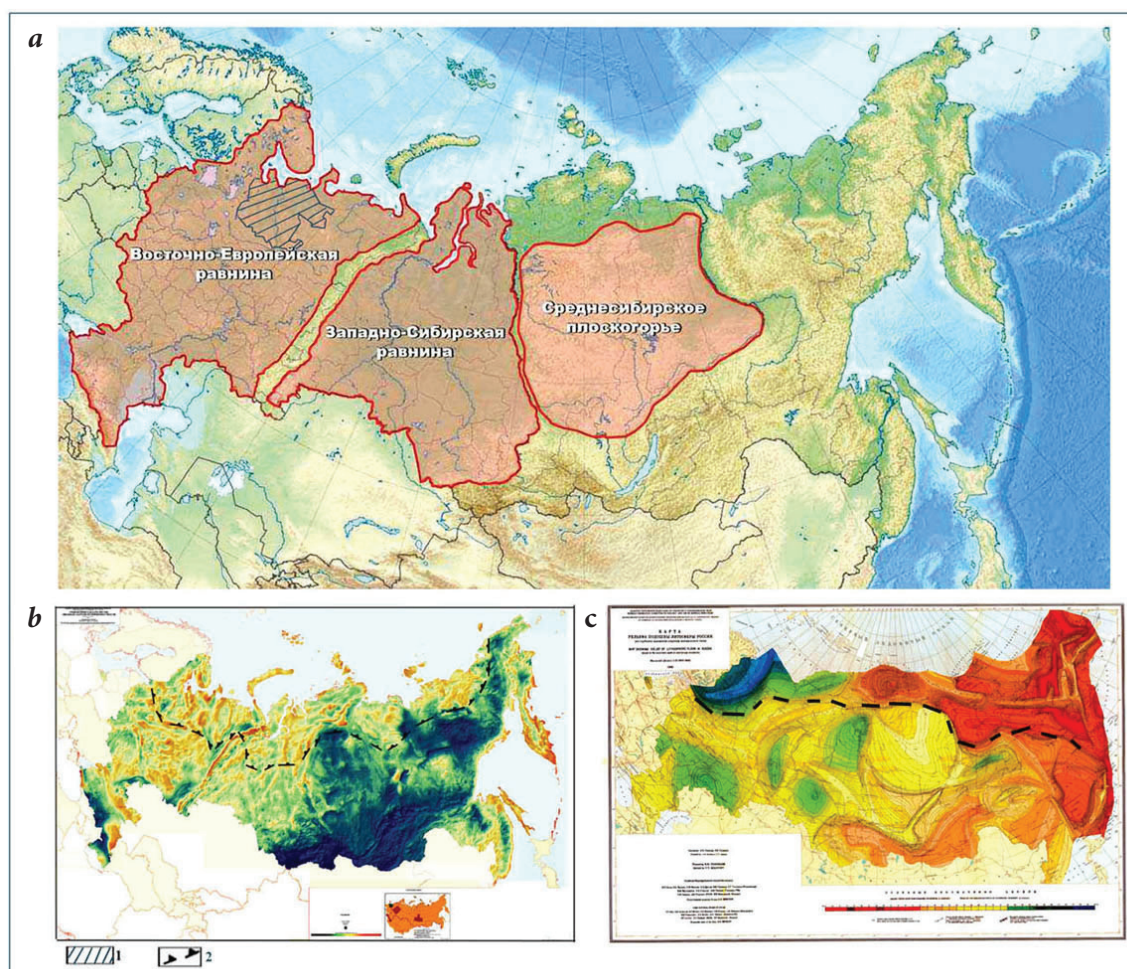


Рис. 1. Сопоставительная характеристика выбранного района исследований: а – положение равнинных территорий; б – гравиметрическая карта России; с – карта рельефа подошвы литосферы России; штриховка: 1 – площадь исследуемого региона; 2 – граница области динамического влияния зоны спрединга

имно увязанных модулей («геоморфометрического», «экзогенного» и «эндогенного»), позволяющих оценить влияние эндогенных и экзогенных процессов с учетом климатических условий (рис. 2). Для оценки предрасположенности территории к развитию экзогенных процессов основное внимание было уделено геоморфометрическому анализу, который включал в себя семь последовательно реализованных блоков, показанных на рисунке 2.

Блок №1. Выбор цифровой модели рельефа (ЦМР) для геоэкологического районирования региона базировался на таких параметрах, как геологическое и геоморфологическое строение региона, доступность, пространственное разрешение и охват территории. Кроме природных факторов, учитывались: однородность исходного материала, отсутствие артефактов и пустот (или возможность их устранения). Были проанализированы глобальные ЦМР: GTOPO30, SRTM, SRTM (3, 30), GMTED2010, ACE2, ETOPO2, ASTER GDEM(v.2) и ArcticDEM. Наиболее подходящей из существующих ЦМР для геоэкологического районирования северных территорий Российской Федерации была выбрана модель ASTER GDEM (v. 2), имеющая детальное пространственное разрешение в сочетании с точностью по высоте и однородностью материала.

Блок №2. Для сопоставления возможностей анализа рельефа был проведен сравнительный анализ модулей обработки рельефа: Spatial Analyst (ArcGIS); Vertical Mapper (MapInfo); Terrain Analysis (SAGA); SEXTANTE (gvSIG) GRASS; QGIS и др. Для задач исследования была выбрана SAGA GIS, обладающая возможностью расчета наибольшего числа геоморфометрических параметров и позволяющая

«добавлять» свои программные блоки и создавать сценарии из уже существующих.

Блок №3. Подготовка ЦМР включала следующие этапы [5]:

- 1) извлечение и объединение данных;
- 2) замену аномальных значений высотных отметок и «пустот» (авторский сценарий на языке Python);
- 3) устранение шероховатостей, шума и ошибок, возникающих при наложении снимков (модуль DTM Filter); для сглаживания ЦМР был применен основанный на среднеквадратическом отклонении фильтр (модуль Simple Filter);
- 4) заполнение впадин (гидрологическая коррекция) методом L. Wang и H. Liu [6].

Далее была проведена проверка корректности полученной модели [5]. Точность построенной ЦМР проверялась сопоставлением с точками плановой съемочной сети открытых векторных данных ГИС Панорама; ЦМР Беломорско-Кулойского плато, построенной с использованием топографических карт масштаба 1:200 000 в ПО ГИС GRASS [7]; высотными значениями топонимов и полевыми измерениями высот GPS-навигатором. Установлено, что лишь 2% значений имеют расхождение свыше 20 м.

Блок №4. Теоретический анализ геоморфометрических параметров показал, что характеристики экзогенных процессов наиболее полно отражают следующие параметры: геометрические (уклон, экспозиция склона, кривизна и индекс расчлененности рельефа); гидрологические (общая и удельная водосборные площади); топографический индекс влажности; индекс мощности эрозии; индекс потенциала плоскостной эрозии; индекс баланса геомасс; опосредованно – топоклиматические (потенциальная солнечная радиация, фотосинтетически активная радиация). Основные проанализи-



Рис. 2. Алгоритм геоэкологического районирования равнинных территорий арктической зоны Российской Федерации.

Таблица 1. Формулы расчета основных параметров рельефа

Параметр	Формула
Уклон поверхности	$SLOPE = \arctan(\sqrt{G^2 + H^2})$
Кривизна	Горизонтальная $PlanC = -\frac{(2EG^2 + 2DH^2 - 2FGH)}{(G^2 + H^2)^{1.5}}$ Вертикальная $ProfC = -\frac{(2DG^2 + 2EH^2 - 2FGH)}{(G^2 + H^2) \cdot (1 + G^2 + H^2)^{1.5}}$
Водосборная площадь	$f_i = \frac{\max(0, Slope_i^p)}{\sum_{j=1}^s (\max(0, Slope_j^p))}$
Индекс мощности эрозии	$SPI = A \cdot \tan(\beta)$
Индекс баланса геомасс	$MBI = \begin{cases} f(TC) \cdot (1 - f(S)) \cdot (1 - f(VDN)), & \text{для } f(TC) < 0 \\ f(TC) \cdot (1 + f(S)) \cdot (1 + f(VDN)), & \text{для } f(TC) > 0 \end{cases}$ $f(x) = \frac{x}{ x + F}$
Экспозиция склонов	$ASPECT = 180^\circ - \arctan\left(\frac{H}{G}\right) + 90^\circ \cdot \left(\frac{G}{ G }\right)$
Индекс расчлененности рельефа	$TRI = \sqrt{\sum (h_{0,0} - h_{i,j})^2}$
Топографический индекс влажности	$TWI = \ln\left(\frac{A}{\tan(\beta)}\right)$
Индекс потенциала плоскостной эрозии	$LS = \left(\frac{As}{22.13}\right)^m \cdot \left(\frac{\sin \beta}{0.0896}\right)^n$
Фотосинтетически активная радиация (ФАР)	$ФАР = 0.42S + 0.60D$

зированные параметры показаны в таблице 1.

Для определения регистрируемого эффекта был проведен анализ исследуемой территории на основе упрощенной теоретической ЦМР с использованием функции (1)

$$Z = (\sin(x) \cdot \cos(y))/5 \quad (1)$$

и на тестовых участках (Онежский п-ов, Беломорско-Кулойское плато) с выборочной проверкой для всей территории области.

Учитывая большое количество геоморфологических параметров и то обстоятельство, что при их расчетах используются одни и те же высотные отметки рельефа, в результате анализа были выбраны значения углов наклона, LS-фактора, индекса расчлененности рельефа и индекса влажности. На локальном уровне были проведено изучение видов кривизны и выбраны профильная (вертикальная) и плановая (горизон-

тальная) кривизна как максимально отражающие процессы эрозии, аккумуляции и транзита осадков. Также было осуществлено выделение форм рельефа по классификации Трёха [8]. Для выделения региональных закономерностей построены карты высот и геоморфометрических параметров (исходная ячейка – 1") и карты с различными окнами фильтрации: 15×15", 30×30" и 60×60". Анализ показал [5], что применение окон осреднения в целом не искажает общую картину распределения высот, но уменьшает их значения. Учитывая слабую расчлененность рельефа региона, применение метода осреднения переводит ряд процессов в более низкий ранг их опасности. Поэтому был применен кластерный анализ методом *k*-средних автора Forgy [9], который не искажает значения исходных данных (2).

$$\sum_{i=1}^k \int p(x) \text{dist}(c_i, x_{ij}) dx, \quad (2)$$

где $p(x)$ – функция плотности вероятности, причем если она неизвестна, то вычисляется на основе набора данных, dist – метрика близости, в данном случае используется минимальное расстояние.

Блок №5. Геоморфометрический анализ проводился по выбранным параметрам с использованием SAGA GIS. В результате был сформирован комплект

карт, готовых для дальнейших логических операций. Карты геоморфометрических параметров дают возможность оценить пространственное положение и количественные характеристики процессов эрозии и аккумуляции. В то же время нецелесообразно делать выводы о возможности проявления опасных процессов, используя значения только одного показателя. Корректнее использовать комбинации выбранных параметров, и, применив ряд логических и математических процедур, проводить вероятностное моделирование проявления экзогенных процессов. Для расчетов была использована 91 сцена глобальной цифровой модели рельефа ASTER GDEM v2 с разрешением 1". Обычно объединение геоморфометрических параметров проводится суммированием баллов [10]. Но в этом случае усиливается влияние взаимно коррелирующих факторов без учета их весов. Мы проводили геоэкологическое районирование территории на основе кластерного анализа выбранных геоморфометрических параметров (угла наклона, *LS*-фактора, индекса расчлененности рельефа и индекса влажности). Процедура состояла из шести этапов [5]:

- 1) кластерный анализ значений угла наклона, *LS*-фактора, индекса расчлененности и влажности;
- 2) нахождение общих границ контуров, соответствующих максимальным, средним и минимальным кластерам значений параметров (эти контуры можно представить в виде множеств и вычислить их пересечение $A \cap B \cap C$, что выполнялось векторизацией растровых областей в полигоны и вычислением пересечения полигонов);
- 3) зона объединенных контуров топографического индекса влажности делилась на две части по степени увлажнения; в результате были выделены две основных области: предрасположенные к подтоплению во время паводков и склонные к заболачиванию;
- 4) с помощью кластерного анализа значений плотности бессточных впадин была выделена текущая зона [11], совпадающая с областью распространения карстующихся пород [12];
- 5) для сравнительной характеристики протекающих в каждой из выделенных зон процессов были посчитаны средние значения геоморфометрических параметров;
- 6) сопоставление карты геоэкологического районирования с геоморфологической картой региона [13].

При последующей детализации для выделения зон с максимальным развитием экзогенных процессов, с протеканием экзогенных процессов, зон аккумуляции и транзита был проведен

кластерный анализ значений углов наклона, индекса расчлененности, профильной и плановой кривизны, индекса Трёха и др.

Блок №6. Для проверки полученных результатов было проведено сопоставление карты геоэкологического районирования с почвами, ландшафтами, геологическим строением, картой четвертичных отложений, геохимией, неотектоникой, пространственным распределением карстовых процессов. Следует отметить, что выделенные зоны имеют генерализованный характер, поэтому наблюдаются некоторые перекрытия, особенно в граничных районах. Тем не менее, все природные особенности территории отражаются в выделенных зонах. Для уточнения границ использовались монофакторные карты геоморфометрических параметров.

Блок №7. Для сопоставления полученных данных с участками антропогенного прессинга и опасными природными процессами на карту геоэкологического районирования были вынесены объекты техногенного воздействия из «Схемы территориального планирования Архангельской области» (СТП) (URL: <https://dvinaland.ru/gov/iogv/minstroy/shemes/>). Согласно с картой объектов техногенного воздействия ([14], СТП), мы провели сопоставление источников антропогенного воздействия с построенными картами геоэкологического районирования и районирования по интенсивности протекания экзогенных процессов.

В модуль экзогенных факторов входили расчеты облачности, базисных поверхностей и энергии рельефа.

Облачность нами анализировалась как величина, коррелирующая с количеством выпадающих осадков и, как следствие, интенсивностью протекания экзогенных процессов. Облачный покров на материалах космической съемки характери-

зуются более высоким значением альбедо и более низкой температурой по сравнению с нижележащей поверхностью, поэтому в видимом и инфракрасном диапазонах облачный покров должен достаточно легко выделяться. Но в присутствии на земной поверхности снежного или ледового покрова выделение облачного покрова вызывает затруднения. Особенно трудно точно выделять границы облаков. Для сокращения влияния этого фактора нами обрабатывались данные только летнего периода. Для выделения облачного покрова на региональном уровне были выбраны данные MODIS на район Архангельской области. Всего было обработано 460 сцен летнего периода с 2005 по 2009 г. с использованием методики [15], которая является более точной для высоких широт, чем стандартный продукт MOD035. В ней используется классификация методом k -ближайших соседей. Подробно методика описана в работе [3]. На локальном уровне анализировались «маски облачности» по данным KA Sentinel-2; Landsat 8; Sentinel-5 2015–2020 годов. Для устранения недостатков наложения сцен использовались данные Sentinel-5P TROPOMI, так как они имеют гораздо больший охват территории и содержат данные о доли облачности в каждом пикселе. Алгоритм расчета выглядел следующим образом:

- 1) получение снимков территории за рассматриваемый период времени;
- 2) выделение канала доли облачности для каждого снимка;
- 3) совмещение всех снимков в один с вставкой в результирующие пиксели медианы (мера среднего) доли облачности.

Базисные поверхности. Для учета положения базиса эрозии, влияющего на интенсивность эрозионных процессов и обусловленного знаком и амплитудой современных подвижек земной коры, был проведен рас-

чет базисных и разностных поверхностей рельефа. Для определения порядка водотоков использовался метод Стралера [16]. Алгоритм расчета включал несколько этапов:

- 1) на основе построенной гидрологически корректной ЦМР строился грид со значениями числа Стралера с помощью модуля «Strahler Order»;
- 2) строились сети долин порядка от 1 до N , с использованием модуля «Channel Network», на вход которому поступала гидрологически корректная ЦМР и грид со значениями числа Стралера в качестве инициализирующего грида;
- 3) строились гриды базисных поверхностей с помощью модуля «Vertical Distance to Channel Network», на вход которого передавалась гидрологически корректная ЦМР и сеть долин.

По мнению [17], для равнинных территорий постоянным стоком воды характеризуются долины, начиная с четвертого порядка. Поэтому нами рассматривались долины начиная с 4-го порядка и заканчивая 10-м порядком (наивысший). На основе этой карты согласно представленному алгоритму были построены карты базисных поверхностей от 4-го до 10-го порядка. Расчет разностей базисных поверхностей выполнялся вычитанием значений соответствующих ячеек рассматриваемых поверхностей (модуль «Grid Calculator»). Участки с максимальными разностными значениями отчетливо совпадают с глубинными неоднородностями земной коры.

Потенциальная энергия рельефа. Вопрос об энергии рельефа и ее связи с энергетическими характеристиками современных процессов экзогенного рельефообразования рассматривался на протяжении практически всего XX в. [18]. Несмотря на это, оценки энергии рельефа, встречающиеся в литературе, весьма противоречивы и ненадежны [19, с. 83]. Как отмечалось в той же работе, современные цифровые данные о рельефе земной поверхности и развитие ГИС-технологий позволяют получать объективные оценки энергетических характеристик процессов рельефообразования. Поэтому нами на основе ЦМР региона рассчитывалась потенциальная энергия рельефа в районе Беломорско-Кулойского плато и прилегающих территорий. Для получения информации о плотности пород была оцифрована карта литолого-физического районирования [20]. Далее из векторного слоя литолого-физических зон с заданным значением плотности составлялся растровый слой, идентичный по разрешению одному из вариантов ЦМР региона (~90x90 м). Затем с помощью растрового калькулятора SAGA GIS в каждой ячейке ЦМР рассчитывалось значение потенциальной энергии по формуле (3):

$$E = g \cdot \sigma \cdot S \cdot h^2, \quad (3)$$

где g — ускорение свободного падения, σ — плотность пород, S — площадь ячейки, h — значение высоты ячейки.

Характеристики свойств земной коры («эндогенный» модуль). Для учета геологических факторов повышенной опасности был проведен анализ геолого-геофизических данных на глобальном (Арктический сегмент земной коры), региональном (Балтийский щит и Русская плита) и локальном уровнях, который показал, что тектонические структуры древних платформ испытывают постоянные подвижки разного знака и интенсивности [3]. Была проведена оценка возможностей цифрового моделирования рельефа для выделения тектонических нарушений, и определены отражающие их геоморфометрические параметры [21]. На глобальном уровне земная кора региона испытывает объемное сжатие из-за воздействия зон спрединга, что должно сопровождаться возникновением продольных изгибов земной коры, выделение которых позволяет фиксировать структуры глубинного тепло- и массопереноса. Для этого нами был проведен анализ пространственных закономерностей отражения структур фундамента в современном рельефе с применением методики и программного обеспечения, разработанных авторами [3, 21]. Вопрос этот имеет не только теоретическое, но и практическое значение, так как наследование и/или отсутствие одного позволяет сделать вывод о: миграции глубинных флюидов; проникновении загрязняющих веществ по латерали и вертикали; возможной активизации разломов при разработке месторождений полезных ископаемых.

Процесс создания цифровой модели рельефа кровли фундамента включал оцифровку изогипс глубин залегания фундамента и создание цифровой модели в среде ESRI ArcGIS 10 с применением модуля *Toro to Raster*. Цифровая модель дневного рельефа региона строилась на основе подготовленной модели ASTER GDEM v.2 [5]. Поскольку высота рельефа земной поверхности измеряется десятками и сотнями метров, а глубина залегания фундамента — километрами, произвести анализ зависимости величин друг от друга графически представляется затруднительным. Поэтому было проведено масштабирование значений высот рельефа дневной поверхности $R(x)$ и глубин фундамента $F(x)$ в диапазоне от 0 до 1. В результате были получены матрицы значений глубины залегания фундамента MF_i и значений высоты рельефа MR_i . Дальнейший анализ осуществлялся на основе анализа значений матриц разности и суммы. Комбинируя значениями матриц разницы и суммы, мы провели районирование исследуемой территории

по формам отражения структур фундамента в дневном рельефе. Прямой характер отражения имеет 61% территории, обратный — 25%, районы, где отражение не отмечается, — 14% территории. Полученные данные говорят о влиянии подвижек земной коры на структуру современного рельефа и, как следствие, на экзогенные процессы.

Существуют данные, позволяющие утверждать о влиянии тектонических процессов на развитие карста. Для выделения зон вероятной активизации карстового процесса нами был применен метод обнаружения бессточных впадин, обычно используемый при гидрологической коррекции ЦМР для устранения ошибок. Подробно методика описана в работе [11]. В результате получена карта плотности бессточных впадин на единицу площади.

Для учета современной эндогенной активности нами были рассчитаны коэффициент дискретности, удельная энергоёмкость мегаблоков [22], плотность разломов, функция дробления и изгибные деформации кровли фундамента европейского Севера России. Исследование вышеперечисленных параметров и отражения блоков с разными параметрами в геоморфометрических характеристиках современного рельефа является актуальным при геологических исследованиях. М.А. Садовским сформулировано положение о том, что геологическая среда всегда находится в критическом энергонасыщенном состоянии (с глубины 5–6 км) и основные сейсмические события всегда происходят только по межблоковым структурам [23], то есть структурам с повышенной энергоёмкостью и раздробленностью. Коэффициент дискретности, характерный для взаимоотношения блоков разных порядков, рассчитывался по формуле (4).

$$L_{i+1}/L_i = K, \quad (4)$$

где K — коэффициент перехода от одного ранга блоков к другому;

L_i – максимальная ширина исследуемого геоблока; L_{i+1} – максимальная ширина геоблока следующего порядка.

K_{cp} , характерные для мегаблоков и трансблоковых зон, рассчитывались как среднее арифметическое по формуле (5):

$$K_{cp} = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n K_i), \quad (5)$$

Значения K_{cp} , дополненные расчетами их энергоёмкости, позволяют уточнить современную геодинамику земной коры и проявление внутриплитной сейсмичности. Формула расчета энергоёмкости (6) приведена ниже:

$$W_{з/с} = \frac{1}{2} \cdot \frac{3(3M - E)}{ME} (\rho g H)^2 + \frac{1}{2M} \cdot \left(\frac{E_c}{V_{ор}} \right)^2, \quad (6)$$

где M – модуль сдвига; E – модуль Юнга; ρ – плотность пород; g – ускорение свободного падения; H – глубина залегания слоя; E_c – сейсмическая энергия землетрясения; $V_{ор}$ – объем блока.

Следует отметить, что расчеты дискретности и энергоёмкости проводятся в пределах одноранговых структур земной коры и не дают общей характеристики территории. К тому же в этом варианте учитываются не все разломные структуры, так как далеко не все разломы являются структурообразующими. Поэтому для уточнения структуры земной коры нами были рассчитаны плотность разломов и функция дробления (по методике, предложенной А.И. Ивановым [24]). Для выделения участков повышенной плотности использовалась схема глубинных разломов [25] масштаба 1:10 000 000. Методом «скользящего окна» была подсчитана их плотность. Размер окна – 100×100 км с перекрытием в 50 км.

Функция дробления («блочности») позволяет оценить предрасположенность конкретной структуры к разрушению ее целостности. Статистической мерой «блочности» квазиоднородного участка по [24]

является произведение расстояний между точками деления в направлениях 1, 2, 3 соответственно (7):

$$B = L_1 \cdot L_2 \cdot L_3. \quad (7)$$

B (по [24]) изменяется в интервале 0÷1, так как длины (L) в произведении (7) были масштабированы на единицу. Выбор такой меры становится понятным, если представить вид трещиноватости участка как три взаимно перпендикулярные серии трещин с густотами λ_k , $k=1, 2, 3$. В этом случае сомножители распределены по экспоненциальному закону; закон распределения имеет вид, представленный в формуле (8), которая была нами применена при расчетах функции дробления («блочности»).

$$f(B) = \frac{1}{2} \ln^2 B. \quad (8)$$

Далее был проведен анализ изгибных деформаций земной коры. Нами были выделены участки устойчивого направления максимальной главной кривизны изгибных деформаций, представленной на карте из [26] в виде прямых линий, которые затем были спроецированы на стереографическую проекцию верхней полусферы сетки Вульфа. В пределах выделенных участков строились сводные розы-диаграммы направлений кривизны изгиба, вызванных современными движениями земной коры. Полученные данные сопоставлялись с геоморфометрическими параметрами [3]. Результаты были верифицированы на отдельных участках и показали высокую корреляцию с облачностью и структурой растительного покрова. Методика и полученные результаты подробно описаны в работе [27].

Результаты

Таким образом, нами была разработана комплексная методика геоэкологического районирования равнинных территорий Российской Федерации от выбора ЦМР и ПО до создания карт геоэкологического районирования региона и районирования по интенсивности протекания эрозионных и аккумулятивных процессов. Геоморфометрический анализ, дополненный расчетными данными о строении земной коры, позволил выделить зоны, потенциально опасные по совокупности факторов (рис. 3).

Так, например, вдоль границы Беломорского мегаблока расположены зоны развития экзогенных процессов. Эта территория характеризуется высокими значениями: коэффициента дискретности, энергоёмкости, плотности разломов, функции дробления, а также максимальными значениями главной кривизны изгибания земной коры и индекса расчлененности рельефа (рис. 3). То есть для активизации экзогенных и эндогенных процессов здесь необ-

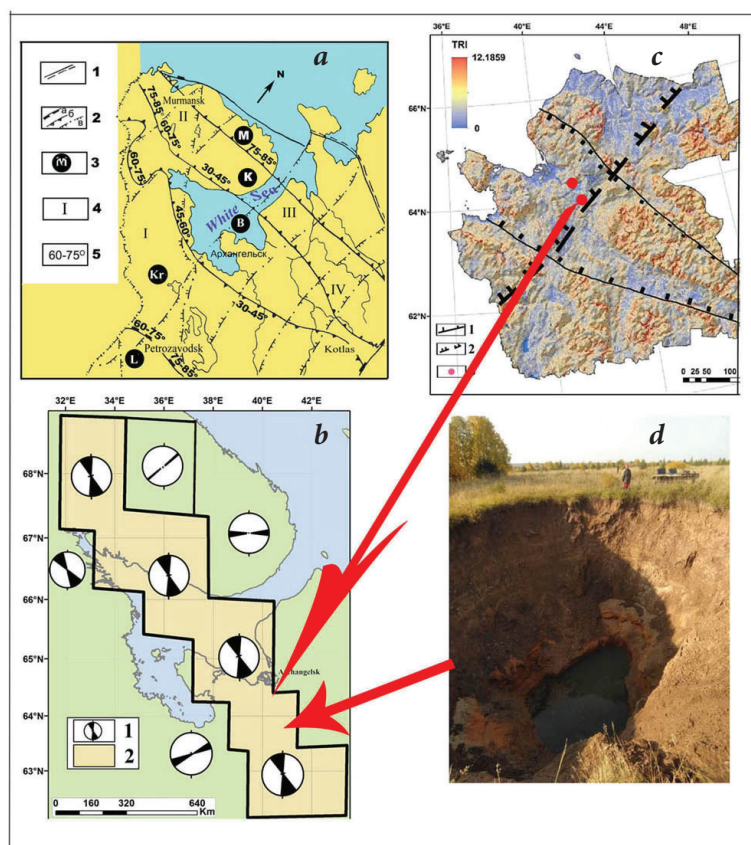


Рис. 3. Схема сопоставления материалов: а – разломно-блоковая тектоника Европейского Севера России, б – зона устойчивого максимального изгиба блоков, с – индекс расчлененности рельефа (красные точки – новые землетрясения), д – карстовая впадина (2021 г.)

ходимо минимальное приложение сил внешнего воздействия, что подтверждается современными сейсмическими событиями и начавшейся активизацией карстовых процессов. В этой зоне расположены основные районы антропогенной деятельности региона, в том числе Архангельская и Котласская городские агломерации.

В результате проведенных исследований нами разработана методика геоэкологического районирования равнинных территорий арктической и приарктической зон России с использованием геоинформационных технологий и цифрового моделирования рельефа. Такой комплексный подход не имеет аналогов, позволяет учесть влияние на состояние окружающей среды природных факторов и оценить их опасность для функционирования техногенных объектов.

Литература

1. В.С. Круподеров, Б.М. Крестин, И.В. Мальнева, В.И. Дьяконова
Геоэкология. Инженерная геоэкология, гидрогеология, геокриология, 2012, №3, 389.
2. В.В. Бронгулев, М.П. Жидков, А.Г. Макаренко
Доклады Академии наук, 2004, 399(4), 540.
3. Ю.Г. Кутинов
Современный геодинамический режим Арктического сегмента земной коры и нефтегазообразование, РФ, Пенза, НИЦ «Социосфера», 2021, 281 с.
4. А.Л. Минеев, Ю.Г. Кутинов, З.Б. Чистова, Е.В. Полякова
Пространство и Время, 2017, №2-3-4, 267.
5. Ю.Г. Кутинов, А.Л. Минеев, Е.В. Полякова, З.Б. Чистова
Выбор базовой цифровой модели рельефа (ЦМР) равнинных территорий Севера Евразии и её подготовка для геологического районирования (на примере Архангельской области), РФ, Пенза, НИЦ «Социосфера», 2019, 176 с.
6. L. Wang, H. Liu
Int. J. Geogr. Inf. Sci., 2006, 20(2), 193.
DOI: 10.1080/13658810500433453.
7. М.Ю. Гофаров, И.Н. Болотов, Ю.Г. Кутинов
Ландшафты Беломорско-Кулойского плато: Тектоника, подстилающие породы, рельеф и растительный покров, РФ, Екатеринбург, Изд. УрО РАН, 2006, 158 с.
8. F.R. Troeh
Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1964, 28(6).
9. L. Morissette, S. Chartier
Tutor. Quant. Methods Psychol., 2013, 9(1), 15.
DOI: 10.20982/tqmp.09.1.p015.
10. М.М. Мехбалиев
Геоморфология, 2009, №4, 45.
DOI: 10.15356/0435-4281-2009-4-45-52.
11. Е.В. Полякова, Ю.Г. Кутинов, А.Л. Минеев, З.Б. Чистова, Т.Я. Беленович
Ученые записки Казанского университета. Сер. Естественные науки, 2021, 163(2), 302.
DOI: 10.26907/2542-064X.2021.2.302-319.
12. Е.В. Шаврина, В.Н. Малков, Е.И. Гуркало
Геоморфология, 2007, № , 90.
13. Атлас Архангельской области, СССР, Москва, ГУГК СССР, 1976, 176 с.
14. М.Г. Губайдуллин
Геоэкологические условия освоения минерально-сырьевых ресурсов Европейского Севера России, РФ, Архангельск, Поморский госуниверситет, 2002, 310 с.
15. H. Koren
Cloud detection in MODIS images, NR note SAMBA/28/09, 2009, 33 pp.

16. **A.N. Strahler**
Eos, Transactions American Geophysical Union, 1957, **38**(6), 913.
17. **И.Ю. Чернова, И.И. Нугманов, А.Н. Даутов**
Геоинформатика, 2010, №4, 9.
18. **А.С. Кузнецов**
Современные проблемы науки и образования, 2014, №6, 1688.
(<https://science-education.ru/ru/article/view?id=16839>).
19. **Б.А. Казанский**
Геотектоника, 2006, №2, 83.
20. **Ю.Г. Кутинов, З.Б. Чистова**
Иерархический ряд проявлений щелочно-ультраосновного магматизма Архангельской алмазоносной провинции. Их отражение в геолого-геофизических материалах, РФ, Архангельск, ОАО «ИПП «Правда Севера», 2004, 283 с.
21. **Ю.Г. Кутинов, З.Б. Чистова, Е.В. Полякова, А.Л. Минеев**
Применение цифровых моделей рельефа (ЦМР) для выделения тектонических структур древних платформ (на примере северо-запада Русской плиты), РФ, Пенза, НИЦ «Социосфера», 2020, 378 с.
22. **Ю.Г. Кутинов, Т.Я. Беленович, З.Б. Чистова**
Вестник геонаук, 2021, **11**(323), 16.
DOI: 10.19110/geov.2021.11.2.
23. **М.А. Садовский**
Избранные труды. Геофизика и физика взрыва, под ред. В.В. Адуйкина, РФ, Москва, Наука, 2004, 440 с.
24. **А.И. Иванов**
В Сергеевские чтения, Вып. 3, *Матер. годичн. сессии РАН*, РФ, Москва, ГЕОС, 2001, 364 с.
25. *Схема зон глубинных разломов территории СССР (по геофизическим данным)*, СССР, Москва, Мингео СССР, под ред. Д.М. Мильштейна, 1979.
26. **А.Ф. Грачев, В.А. Магницкий, Ш.А. Мухамедиев, С.Л. Юнга**
Доклады Академии наук, 1995, **340**(3), 389.
27. **Ю.Г. Кутинов, З.Б. Чистова, Н.А. Неверов**
Вестник Московского университета. Сер. 5. География, 2020, №5, 12.

Methodology for Analyzing the State of the Natural Environment of the Plain Territories of the Arctic Zone of the Russian Federation*

N. Laverov Federal Center for Integrated
Arctic Research, UrB RAS
23 Northern Dvina Emb.,
Arkhangelsk, 163000, Russia
kutinov@fciarctic.ru

N. Laverov Federal Center for Integrated
Arctic Research, UrB RAS
23 Northern Dvina Emb.,
Arkhangelsk, 163000, Russia
zchistova@vandex.ru

N. Laverov Federal Center for Integrated
Arctic Research, UrB RAS
23 Northern Dvina Emb.,
Arkhangelsk, 163000, Russia
lenpo26@vandex.ru

N. Laverov Federal Center for Integrated
Arctic Research, UrB RAS
23 Northern Dvina Emb.,
Arkhangelsk, 163000, Russia
mineew.al@gmail.com

N. Laverov Federal Center for Integrated
Arctic Research, UrB RAS
23 Northern Dvina Emb.,
Arkhangelsk, 163000, Russia
belenovichtva@vandex.ru

N. Laverov Federal Center for Integrated
Arctic Research, UrB RAS
23 Northern Dvina Emb.,
Arkhangelsk, 163000, Russia
na-neverov@vandex.ru

The purpose of the study is to develop a methodology for integrated geoeological zoning of the northern plain territories of the Russian Federation based on digital elevation models. Geomorphometric elevation parameters have been calculated to take into account: a) exogenous factors; b) endogenous factors – the coefficient of discreteness and energy intensity, fault density and the function of crushing the Earth's crust. Such an integrated approach has no analogues and allows taking into account the impact on the state of the environment of exogenous and endogenous, climatic and other natural factors at the global, regional and local levels. As a result, a methodology for integrated geoeological zoning of the northern plain territories of the Russian Federation was developed on the basis of modern digital elevation models using GIS technologies and maps of geoeological zoning.

Keywords: Arctic zone of the Russian Federation, digital relief model, endogenous and exogenous processes, methods of geoeological zoning.

*The work was financially supported by RFBR (project 18-05-60024) and Federal Budget allocations (state target 122011300380-5).

Images & Tables

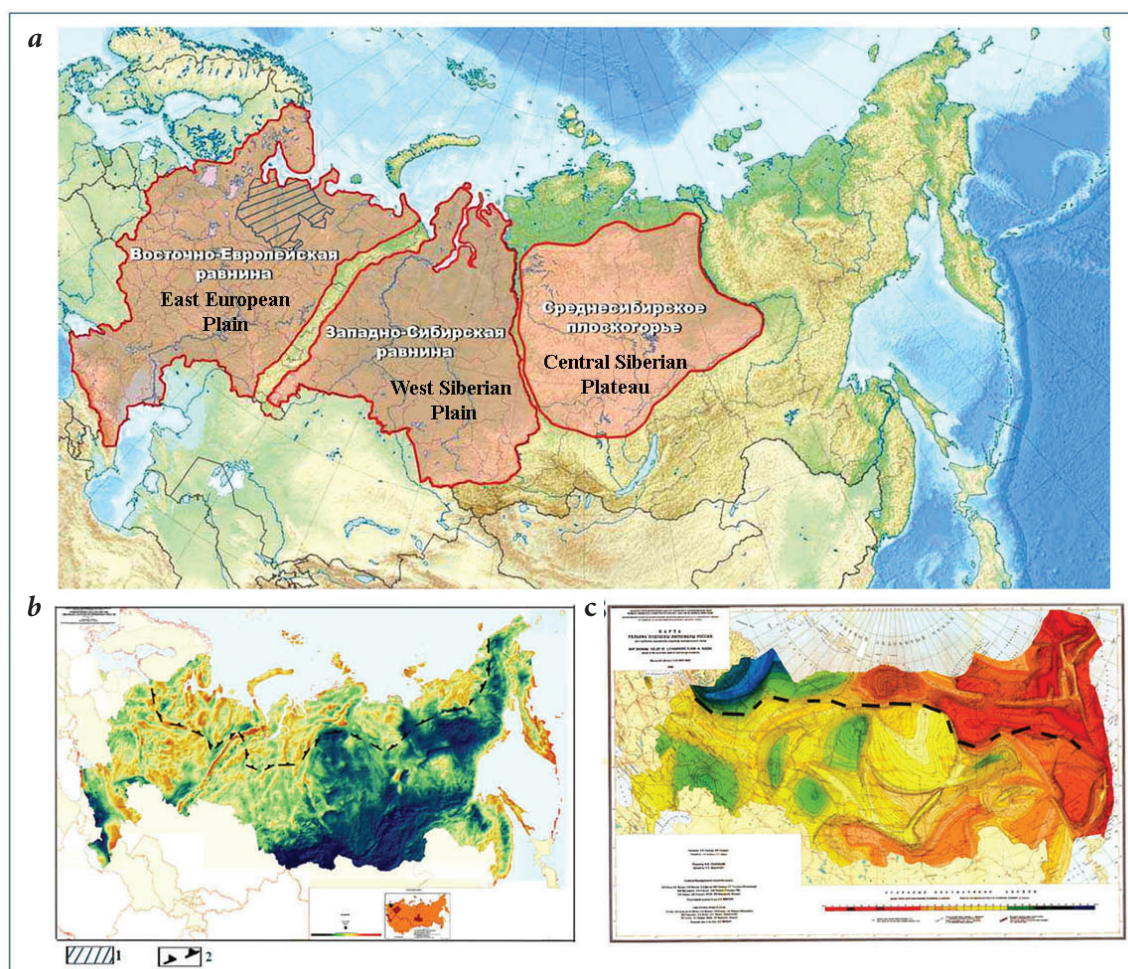


Fig. 1. Comparative characteristics of the selected research area: a – the position of the plain territories; b – gravimetric map of Russia; c – the relief map of the lithosphere basement of Russia; the hatching indicates: 1 – the area of the studied region; 2 – boundary of the area of dynamic influence of the spreading zone.

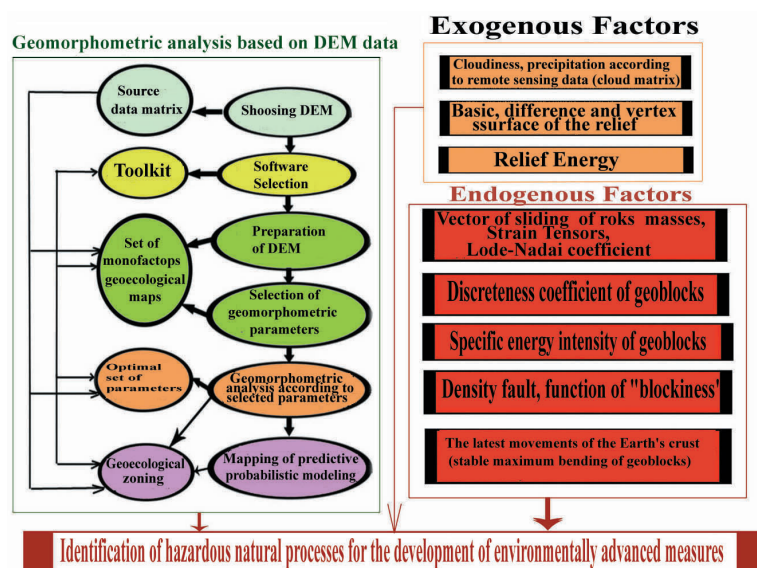
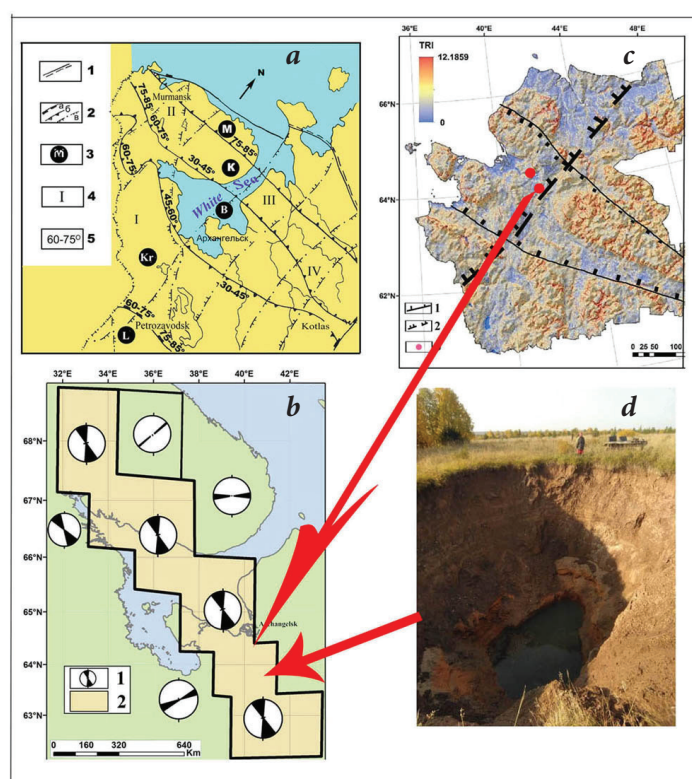


Fig. 2. Algorithm of geo-ecological zoning of plain territories of the Arctic zone of the Russian Federation.

Table 1. Formulas for calculating the main relief parameters

Parameter	Formula
Slope	$SLOPE = \arctan(\sqrt{G^2 + H^2})$
Curvature	Plane curvature $PlanC = -\frac{(2EG^2 + 2DH^2 - 2FGH)}{(G^2 + H^2)^{1.5}}$ Profile curvature $ProfC = -\frac{(2DG^2 + 2EH^2 - 2FGH)}{(G^2 + H^2) \cdot (1 + G^2 + H^2)^{1.5}}$
Catchment area	$f_i = \frac{\max(0, Slope_i^p)}{\sum_{j=1}^8 (\max(0, Slope_j^p))}$
Stream Power Index	$SPI = A \cdot \tan(\beta)$
Mass Balance Index	$MBI = \begin{cases} f(TC) \cdot (1 - f(S)) \cdot (1 - f(VDN)), \\ f(TC) \cdot (1 + f(S)) \cdot (1 + f(VDN)), \end{cases}$ $f(x) = \frac{x}{ x + F}$
Aspect	$ASPECT = 180^\circ - \arctan\left(\frac{H}{G}\right) + 90^\circ \cdot \left(\frac{G}{ G }\right)$
Terrain Ruggedness Index	$TRI = \sqrt{\sum (h_{0,0} - h_{i,j})^2}$
Topographic Wetness Index	$TWI = \ln\left(\frac{A}{\tan(\beta)}\right)$
LS-factor	$LS = \left(\frac{As}{22.13}\right)^m \cdot \left(\frac{\sin \beta}{0.0896}\right)^n$
Photosynthetically active radiation (FAR)	$FAR = 0.42S + 0.60D$

**Fig. 3.** Scheme of comparison of materials: a – fault-block tectonics of the European North of Russia; b – the zone of stable maximum bending of blocks; c – Terrain Ruggedness Index (red dots – new earthquakes); d – karst depression (2021).

References

1. V.S. Krupoderov, B.M. Krestin, I.V. Malneva, V.I. Dyakonova
Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya [Geocology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocriology], 2012, №3, 389 (in Russian).
2. V.V. Brongulev, M.P. Zhidkov, A.G. Makarenko
Doklady Akademii Nauk [RAS Proceedings], 2004, 399(4), 540 (in Russian).
3. Yu.G. Kutinov
Modern Geodynamic Regime of the Arctic Segment of the Earth's Crust and Oil and Gas Formation [Sovremenny geodinamichesky rezhim Arkticheskogo segmenta zemnoy kory i neftegazooobrazovanie], RF, Penza, NITs «Sociosfera» Publ., 2021, 281 pp. (in Russian).
4. A.L. Mineev, Yu.G. Kutinov, Z.B. Chistova, E.V. Poljakova
Space & Time [Prostranstvo i vremya], 2017, №2-3-4, 267 (in Russian).
5. Yu.G. Kutinov, A.L. Mineev, E.V. Poljakova, Z.B. Chistova
Selection of a Basic Digital Elevation Model (DEM) of the Plains of the North of Eurasia and Its Preparation for Geological Zoning (Case Study on Arkhangelsk Region) [Vybor bazovoy tsifrovoy modeli reliefa (TsMR) ravninnykh territory Severa Evrazii i ee podgotovka dlya geologicheskogo rayonirovaniya (na primere Arkhangelskoy oblasti)], RF, Penza, NITs «Sociosfera» Publ., 2019, 176 pp. (in Russian).
6. L. Wang, H. Liu
Int. J. Geogr. Inf. Sci., 2006, 20(2), 193.
DOI: 10.1080/13658810500433453.
7. M.Yu. Gofarov, I.N. Bolotov, Yu.G. Kutinov
Landscapes of the White Sea – Kuloy Plateau: Tectonics, Underlying Rocks, Relief and Vegetation [Landshafty Belomorsko-Kuloyetskogo plato: Tektonika, podstilayushchie porody, relief i rastitelny pokrov], RF, Ekaterinburg, UrBof RAS Publ., 2006, 158 pp. (in Russian).
8. F.R. Troeh
Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1964, 28(6).
9. L. Morissette, S. Chartier
Tutor. Quant. Methods Psychol., 2013, 9(1), 15.
DOI: 10.20982/tqmp.09.1.p015.
10. M.M. Mehbaliyev
Geomorfologiya, 2009, №4, 45 (in Russian).
DOI: 10.15356/0435-4281-2009-4-45-52.
11. E.V. Poljakova, Yu.G. Kutinov, A.L. Mineev, Z.B. Chistova, T.Ya. Belenovitch
Uchenye zapiski Kazanskogo Universiteta. Ser. Estesvennyye nauki [Studies of Kazan University. Ser. Natural Sciences], 2021, 163(2), 302 (in Russian).
DOI: 10.26907/2542-064X.2021.2.302-319.
12. E.V. Shavrina, V.N. Malkov, E.I. Gurkalo
Geomorfologiya, 2007, №2, 90 (in Russian).
13. Atlas of Arkhangelsk Region [Atlas Arhangelskoy oblasti], USSR, Moscow, GUGK SSSR Publ., 1976, 176 pp. (in Russian).
14. M.G. Gubaidullin
Geocological Conditions for the Development of Mineral Resources of the European North of Russia [Geoekologicheskie uslovia osvoeniya mineralno-syrevykh resursov Evropeyskogo Severa Rossii], RF, Arkhangelsk, Pomorsky State Univ. Publ., 2002, 310 pp. (in Russian).
15. H. Koren
Cloud detection in MODIS images, NR note SAMBA/28/09, 2009, 33 pp.
16. A.N. Strahler
Eos, Transactions American Geophysical Union, 1957, 38(6), 913.
17. I.Yu. Chernova, I.I. Nugmanov, A.N. Dautov
Geoinformatika, 2010, №4, 9 (in Russian).
18. A.S. Kuznetsov
Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya [Modern Problems of Science and Education], 2014, №6, 1688 (in Russian).
(<https://science-education.ru/ru/article/view?id=16839>).
19. B.A. Kazanskii
Geotectonics, 2006, 40(2), 150.
20. Yu. G. Kutinov, Z.B. Chistova
Hierarchical Series of Alkaline-Ultrabasic Magmatism Manifestations in Arkhangelsk Diamondiferous Province. Their Reflection in Geological and Geophysical Materials [Ierarkhichesky ryad proyavleny shchelochno-ultraosnovnogo magmatizma Arkhangelskoi almazonosnoy provintsii. Ikh otrazhenie v geologo-geofizicheskikh materialakh], RF, Arkhangelsk, OJSC “IPP “Pravda Severa”, 2004, 283 pp. (in Russian).
21. Yu.G. Kutinov, Z.B. Chistova, E.V. Polyakova, A.L. Mineev
The Use of Digital Elevation Models (DEM) to Highlight the Tectonic Structures of Ancient Platforms (Case Study on the North-West Region of the Russian Plate) [Primenenie tsifrovyykh modelei reliefa (TsMR) dlya vydeleniya tektonicheskikh struktur drevnykh platform (na primere severo-zapada Russkoy plity)], RF, Penza, NITs «Sociosfera» Publ., 2020, 378 pp. (in Russian).
22. Yu. G. Kutinov, T.Ya. Belenovitch, Z.B. Chistova
Vestnik of Geosciences, 2021, 11(323), 16 (in Russian).
DOI: 10.19110/geov.2021.11.2.
23. M.A. Sadovsky
Selected Works. Geophysics and Explosion Physics [Izbrannye trudy. Geofizika i fizika vzryva], Ed. V.V. Adushkin, RF, Moscow, Nauka Publ. House, 2004, 440 pp. (in Russian).
24. A.I. Ivanov
In Sergeevskie chteniya. Mater. godichn. sessii RAN. Vyp.3 [Sergeev Readings, Vol. 3, Proc. Annual Session of RAS], RF, Moscow, GEOS Publ. House, 2001, 364 pp. (in Russian).
25. Scheme of Deep Fault Zones in the USSR Territory (according to Geophysical Data) [Shema zon glubinnykh razlomov territorii SSSR (po geofizicheskim dannym)], USSR, Moscow, Mingeo USSR Publ., Ed. D.M. Milshtein, 1979 (in Russian).
26. A.F. Grachev, V.A. Magnickij, Sh.A. Muhamediev, S.L. Junga
Doklady Akademii Nauk [RAS Proceedings], 1995, 340(3), 389 (in Russian).
27. Yu.G. Kutinov, Z.B. Chistova, N.A. Neverov
Vestnik Moskovskogo Universiteta, Ser. 5, Geografiya [Bulletin of MSU, Ser. 5, Geography], 2020, №5, 12 (in Russian).