

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 556.551(470.11)

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ВОДОСБОРНОГО БАСЕЙНА БЕЛОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ ГЕОМОРФОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РЕЛЬЕФА

© 2024 г. Е. В. Полякова¹*, Ю. Г. Кутинов¹, З. Б. Чистова¹, А. Л. Минеев¹

¹ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова
УрО РАН, пр. Никольский, 20, Архангельск, 163020 Россия

*E-mail: lenpo26@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.07.2023 г.

После доработки 28.09.2023 г.

Принята к публикации 15.11.2023 г.

В статье авторами рассмотрена восточная часть водосборного бассейна Белого моря в административных границах Архангельской области. Цель исследования — оценка потенциальной предрасположенности основных рек Архангельской обл. к сносу и накоплению осадочного материала (в том числе и загрязненного) на основе расчета геоморфометрических параметров рельефа. Анализ источников загрязнения на глобальном (Европейский центр дестабилизации окружающей среды), региональном (Кольский промышленный узел) и локальном уровнях (предприятия Архангельской обл.) показал, что регион является реципиентом загрязнения. Основной путь переноса загрязняющих веществ — атмосферный, который в дальнейшем трансформируется в перенос водотоками во время паводков. На локальном уровне перенос осуществляется за счет стока вод. Во всех вышеперечисленных вариантах характер рельефа играет доминирующую роль в перераспределении загрязнения. Каждый из вышеперечисленных видов переноса может быть учтен и оценен при расчете геоморфометрических параметров рельефа, которые количественно демонстрируют потенциальную предрасположенность территории к сносу, транзиту и накоплению осадочного материала. Показана высокая роль бессточных впадин как приемников и накопителей загрязнения при расчете стока в поверхностные и подземные воды и переносе материала, как в ионной, так и во взвешенной форме. На основе расчета топографического индекса влажности (TWI), индекса расчлененности рельефа (TRI), индекса потенциала плоскостной эрозии (LS-фактор) сделан вывод, что в бассейнах крупных рек Архангельской обл.: Северная Двина и Пинега, преобладают процессы смыва и транзита, и, как следствие, переноса загрязняющих веществ. А в бассейнах рек Онега и Мезень — преимущественны процессы аккумуляции осадочного материала.

Ключевые слова: водосборные бассейны рек, водосборная площадь, цифровая модель рельефа, геоморфометрические параметры, Архангельская область

DOI: 10.31857/S0869780924010078, EDN: GNTOQA

ВВЕДЕНИЕ

Реакция геологической среды на природные или антропогенные воздействия во многом зависит от характера рельефа местности, который является своего рода “перераспределителем” эндогенных и экзогенных материальных потоков на земной поверхности. Не являются исключением и водные потоки, которые, воздействуя на земную поверхность, производят вначале разрушение и смыв почв и горных пород, затем перемещение разрыхленного материала вниз по течению водотока или наклона склона (при плоскостном смыве) и, наконец, отложение — аккумуляцию (или многократное переотложение) сносимого материала на относительно более низких уровнях (базисе эрозии). В состав сносимого материала входят не только природные, но и антропогенные образования,

как в ионной, так и во взвешенной форме. Поэтому в геоморфометрическом анализе местности широко используются такие базовые гидрологические параметры как площадь водосбора и объем поверхностного стока, позволяющие проводить оценку и моделирование процессов эрозии и аккумуляции переносимого материала, в том числе и загрязняющих веществ.

В статье авторами рассмотрена восточная часть водосборного бассейна Белого моря в административных границах Архангельской области. Выбор объекта исследований объяснялся следующими соображениями:

1. Общая площадь водосборного бассейна Белого моря составляет 717.7 тыс. км², из них административно Архангельской обл. принадлежат 302.1 тыс. км² (41.9%), республикам Коми

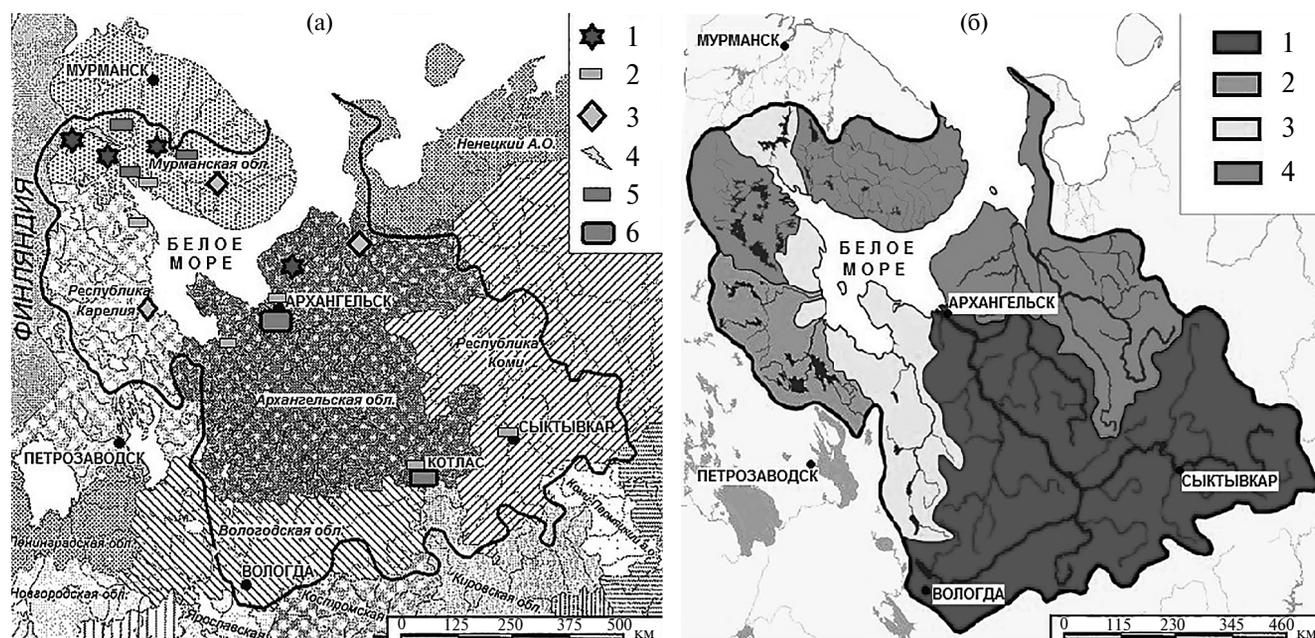


Рис. 1. Схема водосборного бассейна Белого моря: а — с субъектами РФ и источниками загрязнения по [20]: 1–6 — антропогенные объекты воздействия в пределах бассейна: 1 — горно-обогатительные и горно-добывающие; 2 — целлюлозно-бумажные; 3 — транспортные; 4 — энергетические; 5 — горно-металлургические; 6 — комплексного воздействия; б — районирование бассейна по степени негативного воздействия речного стока на качество морских вод по [1]: 1–4 — воздействие: 1 — недопустимое, 2 — допустимое, 3 — слабое, 4 — незначительное.

и Карелия — 142.7 тыс. км² (19.8%) и 89.2 тыс. км² (12.4%), Мурманской и Вологодской областям — 78.4 тыс. км² (10.9%) и 78.3 тыс. км² (10.9%), соответственно, а также небольшие площади Кировской и Костромской областям, Пермскому краю, Ненецкому автономному округу и Финляндии [20]. То есть наибольшая часть водосборного бассейна Белого моря приурочена к территории Архангельской обл. (рис. 1а).

2. Речные сети западной (Кольско-Карельской) и восточной (Архангельской) частей бассейна резко отличаются друг от друга. В западной части реки небольшие со слабо развитыми долинами и относятся к озерно-речным системам. Реки восточной части водосбора крупные, имеют хорошо развитые речные долины с большими площадями поверхностных водосборных бассейнов и высокими величинами твердого стока. Так, эти значения для основных рек в среднем составляют: Мезень — 320, Онега — 315, Северная Двина — 3200 тыс. т/год [18]. Кроме того, для восточной части характерны высокие средние значения модуля выноса химических элементов подземными водами — 18 т/год·км², в отличие от западной — 1.7 т/год·км² [3]. Это, скорее всего, обусловлено развитием эрозионных процессов в бассейнах рек и различием в составе водовмещающих горных пород, а не только антропогенным воздействием. В то же время модуль ионного стока р. Северная Двина составляет около 40 т/км² в год,

что на 25% больше, чем у р. Печора, протекающей по схожим породам осадочного чехла [2].

3. Интегральная оценка степени негативного воздействия речного стока на качество морских вод, проведенная А. С. Булавиной [1], позволила ей сделать вывод, что водосборные бассейны крупных рек Архангельской обл. по состоянию на 2018 г. относятся к разным категориям по степени воздействия. Так, реки Северная Двина и Вычегда характеризуются сильным, Онега — умеренным, а Пинега и Мезень — слабым воздействием речного стока на качество морских вод. В то время как реки Кольско-Карельского побережья характеризуются в основном умеренным и слабым воздействием, хотя плотность антропогенных источников загрязнения этой территории намного выше, чем в Архангельской обл. (см. рис. 1б).

Все вышеизложенное определяет актуальность дальнейшего изучения рек восточной части водосборного бассейна Белого моря с применением современного объективного аппарата геоморфометрии.

Цель исследования — оценить потенциальную предрасположенность основных рек Архангельской области к сносу и накоплению осадочного материала (в том числе и загрязненного) на основе расчета геоморфометрических параметров рельефа.

ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ И МИГРАЦИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ НА РАЗНЫХ УРОВНЯХ ДЕТАЛИЗАЦИИ

Основным источником загрязнения территории Архангельской области на глобальном уровне выступает Европейский центр дестабилизации окружающей среды [5]. В результате тропосферного переноса северные регионы РФ являются областью глобального выпадения загрязняющих веществ (органических соединений и тяжелых металлов), накапливаемых за счет атмосферных выбросов индустриально развитых стран Западной Европы. Непосредственно на границе с исследуемым регионом к таковым относятся Норвегия — соединения никеля, меди, марганца, ртути; Финляндия — трудноокисляемые органические вещества, соединения меди, железа [8]. Наибольшее накопление загрязняющих веществ на территории Архангельской обл. происходит зимой в связи с преобладанием ветров юго-западного направления. А из-за длительности зимнего периода регион выступает в большей степени реципиентом трансграничного загрязнения, нежели донором.

На региональном уровне отмечаются два крупных очага загрязнения с потенциалом включения в тропосферный трансграничный перенос — Кольский полуостров и г. Норильск. Для исследуемого региона преимущественное значение имеют выбросы предприятий Кольского полуострова (см. рис. 1а). То есть и на региональном уровне Архангельская обл. выступает как приемник поллютантов.

Основным видом переноса загрязнения от глобальных и региональных источников является атмосферный тип с жидкими (дожди) и доминирующими твердыми (снег) осадками. В дальнейшем происходит перераспределение загрязняющих веществ в зависимости от характера эрозионных процессов и форм рельефа.

Снег в высоких и умеренных широтах — основной первичный накопитель поллютантов, что подтверждается массовыми анализами проб снега на водосборах [18]. В среднем за год в Архангельской обл. выпадает около 33% осадков в твердом (снег), 55% — жидком (дождь) и 12% — смешанном видах (снег с дождем). Но жидкие осадки достаточно равномерно включаются в сток вод и частично поглощаются почвами и породами. Для осадков в твердом и смешанном видах ситуация выглядит иначе. Как и для всех северных регионов России, ряд специфических особенностей формирования химического состава вод обусловлен климатическими параметрами [18]: питание рек в большей степени определяется атмосферными осадками, до 65% годового стока региона приходится на весеннее половодье; аккумуляция атмосферных выпадений в снежном покрове происходит в течение длительного времени (от 5 на юге до 10 месяцев на

севере), а в короткий период весеннего половодья они лавинно поступают в водосборные бассейны. По мнению Т.И. Моисеенко [18], во время снеготаяния почва находится в промерзшем состоянии, т.е. ее верхний слой практически водонепроницаем в течение почти всего периода снеготаяния, и выносимый материал почти не накапливается в почвах и породах.

Авторы считают, что этот процесс включает в себе несколько последовательных стадий, характеризующихся разными природными процессами. На первом этапе сток происходит по мерзлым грунтам, перенося материал, законсервированный ранее в снежном покрове (плоскостной смыв). На втором этапе плоскостной смыв осуществляется по частично оттаявшим грунтам, и к переносимому материалу добавляются взвешенные частицы из размываемых почв и горных пород. Происходит выщелачивание карбонатных и сульфатных пород палеозоя под действием сульфатов, нитратов и хлора, выпадающих с дождями. Вместе с тяжелыми металлами значимую роль в формировании трансграничного загрязнения атмосферного воздуха и осадков играет перенос кислотообразующих соединений, главным образом газообразных оксидов серы и азота. В процессе трансграничного переноса этих соединений происходит их химическая трансформация до кислотных ионов и, как следствие, выпадение на территории соседних регионов в виде кислотных осадков и сухого осаждения. Исследования, проведенные для Архангельской обл., говорят о том, что в 88% случаев нейтрализация осадков не происходит, что указывает на недостаток в их составе кислотных нейтрализаторов [19]. В то же время невысокая минерализация речных вод свидетельствует о том, что нейтрализация все же осуществляется, в основном за счет горных пород (карбонаты и сульфаты палеозоя). Следует отметить, что плоскостной сток происходит по склонам не сплошным слоем, а струями временных водотоков различной величины, по сети борозд, промоин и ложбин, распределенных в соответствии с микрорельефом местности.

На третьем этапе при освобождении речных потоков от ледового покрова включается линейная эрозия почв.

В целом время начала каждого из трех вышеперечисленных этапов обусловлено не только температурой, но и уклоном, экспозицией, профильной кривизной склонов, а также расчлененностью местности, которая отражается в значении индекса расчлененности рельефа. Все эти параметры могут быть рассчитаны по цифровой модели рельефа.

На локальном (местном) уровне источниками загрязнения являются Архангельская и Котласская промышленные агломерации, крупные объекты лесохимической отрасли, интенсивная эксплуатация лесных ресурсов с их последующей переработкой

и, в значительно меньшей степени, освоение месторождений полезных ископаемых.

По степени отрицательного воздействия на водные объекты Архангельской обл., к приоритетными, в первую очередь, относятся предприятия лесной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности, а также объекты сельского хозяйства, нефтесервиса и социальной инфраструктуры. Обычно считается, что область загрязнения от данных объектов носит локальный характер и, как правило, ограничивается площадью производственных объектов и населенных пунктов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наши данные свидетельствуют о том, что геоморфометрический анализ цифровой модели рельефа (ЦМР) региона позволяет выделять зоны сноса (денудации), транзита (перемещения) и накопления (аккумуляции) осадочного материала, включая загрязняющие вещества. На площадях аккумулятивного для атмосферного переноса рельефа — картировать площади бессточных накопителей (впадины), способствующие постепенному смыву поллютантов в поверхностные воды в периоды паводков и таяния снега, а также их аккумуляции и проникновению вглубь к водоносным горизонтам [10, 11, 13].

Расчет всех геоморфометрических параметров осуществлялся на основе ЦМР Архангельской обл. [4] в программной среде SAGA GIS. В качестве исходной ЦМР была выбрана находящаяся в свободном доступе ЦМР ASTER GDEM v2, полностью покрывающая, в отличие от наиболее часто используемой ЦМР SRTM, всю площадь исследований, с разрешением 1 угловая секунда (~30×30 м), размер сцены 4100 на 4200 элементов (вся территория Архангельской обл., 12734342 ячеек). ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) GDEM (Global Digital Elevation Model) — глобальная цифровая модель рельефа, разработанная Министерством экономики, торговли и промышленности Японии (Ministry of Economy, Trade, and Industry, METI) и Национальным управлением по авиации и исследованию космического пространства США (NASA). Для создания ASTER GDEM использовалась автоматическая обработка всего архива данных ASTER с 1999 г. [4, 9]. Вторая версия ASTER GDEM вышла в декабре 2011 г., коррекция модели продолжается и по настоящее время.

Как и все существующие ЦМР ASTER GDEM v2, содержит участки с отсутствующими данными (“пустоты”), а также артефакты и “шумы”. Подготовка ЦМР включала в себя следующие операции: извлечение и объединение исходных данных; замену аномальных значений высотных отметок и “пустот”, устранение ошибок, возникающих при

наложении снимков (модуль DTM Filter) [4]. Отсутствующие данные (1.24% от площади исследования) были заполнены данными ЦМР GMTED2010 (одна сцена 50n030e_20101117_gmted_mea075) с искусственно уменьшенным размером ячейки до 1 угловой секунды. Гидрологическая коррекция ЦМР осуществлялась с помощью модуля Fill Sinks по методу L. Wang и H. Liu [24]. Модель проверялась на релевантность [6]. Дальнейшие расчеты проводились по подготовленной и гидрологически корректной ЦМР с исходным разрешением 30×30 м (рис. 2а).

Для расчета площади водосборных бассейнов авторами был использован алгоритм MFD, включенный в программную среду SAGA GIS (рис. 2в), позволяющий учитывать эффект расхождения водотоков [15].

Затем было проведено бассейновое районирование территории по следующим геоморфометрическим параметрам: площадь бассейна, общая длина водотоков, топографический индекс влажности (TWI), индекс расчлененности рельефа (TRI), индекс потенциала плоскостной эрозии (LS-фактор) [4]; при гидрологической коррекции ЦМР рассчитана плотность бессточных впадин на единицу площади [14]; при сопоставлении расчетов угла наклона, LS-фактора и индекса расчлененности рельефа осуществлено деление территории на области сноса, транзита и накопления осадочного материала [13].

Понятие водосборной площади имеет большое значение при гидрологическом и геоэкологическом анализе, так как этот параметр определяет площадь участка, влага с которого (дождь, талая вода и т.д.) может быть суммирована. В гидрологии и геоморфометрии понятие водосборной площади имеет разную смысловую нагрузку. В гидрологическом смысле водосборный бассейн — это часть земной поверхности, с которой происходит сток поверхностных и подземных вод в конкретный водоем или водоток, включая его притоки (рис. 2б). Бассейн каждого водоема включает в себя как поверхностный, так и подземный водосборы. На практике определение границ подземного водосбора сложно, поэтому за величину водосборного бассейна чаще принимают только площадь поверхностного водосбора [7].

Применительно к цифровым моделям рельефа можно говорить об общей водосборной площади и рассматривать ячейку ЦМР как некоторый конечный участок площади, в котором суммируются осадки. При расчете средствами ГИС значение конкретной ячейки ЦМР равно площади участка, с которого стекаются потоки в данную конкретную ячейку (см. рис. 2в).

Водосборная площадь в геоморфометрическом анализе представляет собой площадь аккумуляции стекающих вод и больше соответствует понятию

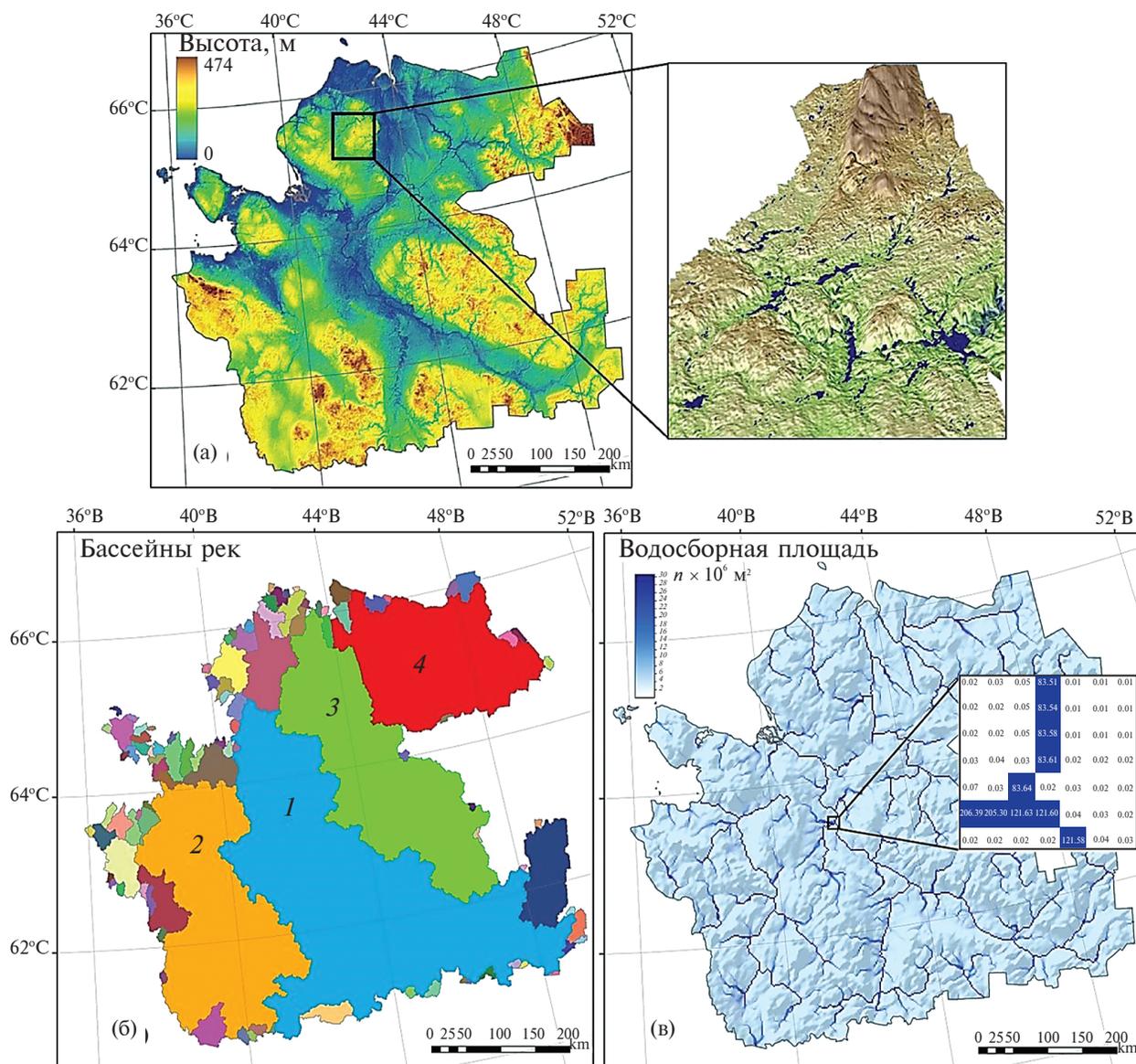


Рис. 2. Цифровая модель рельефа с разрешением 1 угловая секунда и ее увеличенный фрагмент (а) и схемы водосборных площадей крупных рек в пределах Архангельской обл. в гидрологическом (б) и геоморфометрическом (в) понятиях. б — бассейны крупных рек: 1 — Северной Двины, 2 — Онеги, 3 — Пинеги, 4 — Мезени.

долины реки с учетом поймы и частично первой надпойменной террасы, в отличие от водосборного бассейна в его классическом понимании, и не охватывает всю площадь стока поверхностных вод. Такое различие предполагает проведение раздельного анализа площадей максимального развития плоскостной эрозии, зон сноса (денудации), транзита (перемещения) и накопления (аккумуляции) переносимого материала. Является ли это недостатком геоморфометрического анализа? На наш взгляд, это техническая особенность применяемой процедуры, требующей учета ее особенностей.

Как указывалось выше, рельеф Архангельской обл. представляет собой сочетание возвышенностей, разделенных протяженными долинами

крупных рек: Северная Двина, Онега, Пинега, Мезень, которые на региональном уровне являются основными зонами транзита и аккумуляции осадочного материала. Естественно, что основные источники поступающего в реки материала — их водосборные бассейны, “ядром” которых являются плоские эрозионные палеозойские плато, сложенные каменноугольными и пермскими карбонатными и сульфатными породами. Поскольку углы наклона склонов рельефа региона характеризуются малыми значениями, то водоразделы плохо выражены, и для определения площади водосборных бассейнов применяется понятие площади речных систем (совокупность всех рек, впадающих главную реку). В результате часть водосборного бассейна,

для которого характерен только плоскостной смыв без выраженных постоянных водотоков, обычно не рассматривается и не учитывается.

Для плоских поверхностей плато характерно также наличие бессточных впадин (покрывающих 38% всей площади региона) с малыми глубинами (от 1 до 5 м), сброс воды из которых во время снеготаяния тоже не учитывается.

Исторически сложилось, что освоение региона шло по крупным водотокам, особенно вдоль Северной Двины. В результате основное антропогенное воздействие на природную среду приурочено к крупным рекам региона. Помимо расположенных на берегах рек предприятий и населенных пунктов, к видам воздействия относятся сельскохозяйственные работы, вырубка лесов на водосборах, провоцирующая развитие эрозионных процессов (в первую очередь смыв почв и размыв берегов). Кроме того, вырубка лесов сопровождалась многолетним молевым сплавом. Объединяют эти процессы водный тип загрязнения водоемов и трансформация берегов за счет интенсивного развития эрозионных процессов. Для фиксации этих процессов и оценки их развития необходим расчет гидрологических и геометрических параметров рельефа.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ И ОБСУЖДЕНИЕ

Отклик геологической среды на любой вид природного и антропогенного воздействия непосредственно взаимосвязан с рельефом местности. Все элементы и формы рельефа по своей природной направленности можно разделить на три основные группы, к которым относятся зоны сноса (денудации), транзита (перемещения) и накопления (аккумуляции) осадочного материала. Воздействие антропогенного загрязнения на каждую из этих зон различно. В работе [16] отмечается, что в областях сноса проникновение загрязняющих веществ на глубину ограничено, а площадное распространение, напротив, значительно. В то же время, это же загрязнение в зонах накопления вызывает его аккумуляцию и проникновение в глубинные горизонты геологической среды, обуславливая смену химического состава подземных вод. Поскольку зоны сноса приурочены к повышенным формам рельефа, там аккумулируется наименьшее количество загрязняющих веществ. В зонах транзита (на склонах, надпойменных террасах) происходит перенос загрязнения в зоны накопления (поймы рек, понижения и замкнутые формы рельефа), которые характеризуются наибольшей способностью к аккумуляции загрязняющих веществ.

Упрощенный вариант районирования территории Архангельской обл. приведен на рис. 3. Здесь зонам сноса соответствуют максимальные значения высотных отметок, LS-фактора, индекса расчлененности рельефа; зонам размыва и транзита

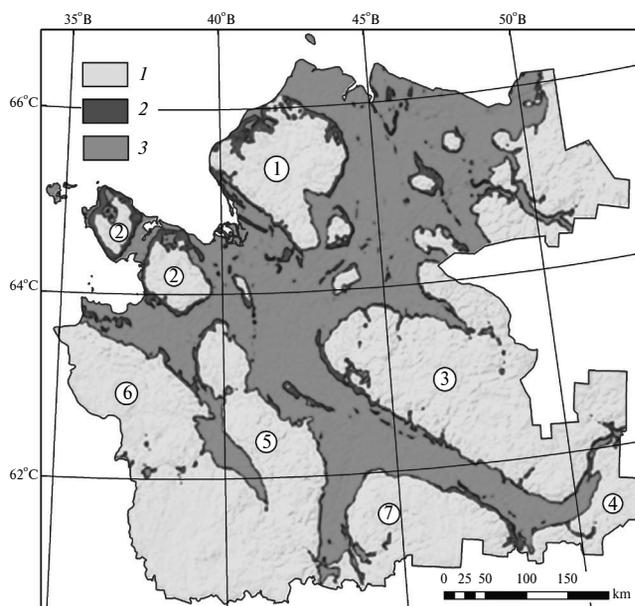


Рис. 3. Схема районирования региона по условиям накопления и переноса материала: 1–3 — зоны: 1 — сноса, 2 — размыва и транзита, 3 — аккумуляции. Цифры в кружках — возвышенности и плато: 1 — Беломорско-Кулойское плато; 2 — плато Онежского полуострова; 3 — Двино-Мезенская возвышенность; 4 — возвышенность Северные Увалы; 5 — Онего-Двинская возвышенность; 6 — Ветренный Пояс; 7 — Вельско-Устьянское плато.

материала — максимальные значения углов наклона, определенный характер кривизны склонов и их экспозиции; зонам аккумуляции — максимальные значения топографического индекса влажности и минимальные значения базиса эрозии.

Плато и возвышенности имеют в основном ровную поверхность с малыми углами наклона. Коренные породы этих структур рельефа являются растворимыми, и им присущи процессы химического выщелачивания, сопровождающиеся развитием карстовых процессов [14]. Поэтому на территории области широко развиты бессточные понижения, картируемые в виде бессточных впадин на цифровой модели рельефа и являющиеся локальными аккумуляторами водного материала от таяния снега и выпадения осадков. Обычно считается, что бессточным впадинам на ЦМР соответствуют болота, широко развитые в регионе. Вопрос этот достаточно актуален для заболоченных территорий бореальных лесов, так как для учета величины стока вводятся коэффициенты заболоченности, озерности, лесистости, но не учитываются те бессточные впадины, которые не совпадают с болотами.

Нами был произведен расчет плотности бессточных впадин и их кластерных значений [14] и проведено сопоставление с плотностью болот (рис. 4а). Как видно из рис. 4а, далеко не все территории максимальных значений плотности бессточных впадин совпадают с площадями повышенной

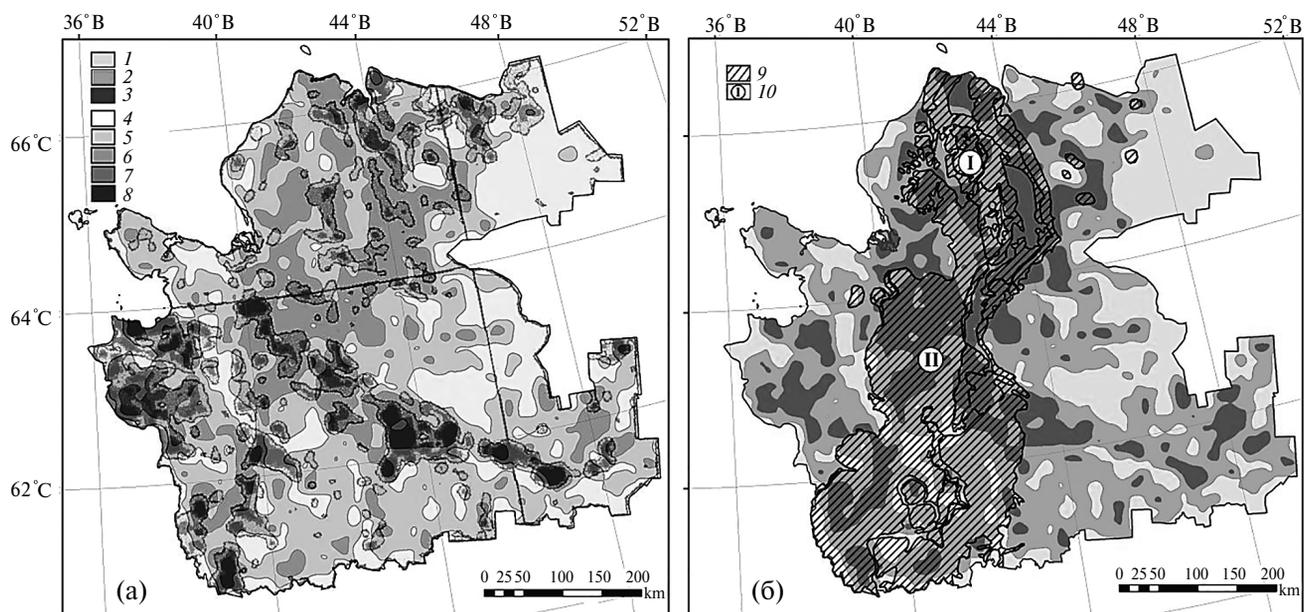


Рис. 4. Схема сопоставления кластерных значений плотности бессточных впадин с плотностью болот (а) и распространением карстующихся пород (б) на территории Архангельской обл. 1–3 — кластерные значения плотности бессточных впадин: 1 — минимальные; 2 — средние; 3 — максимальные; 4–8 — плотность болот, %: 4 — менее 10; 5 — 10–20; 6 — 20–30; 7 — 30–40; 8 — более 40; 9 — полоса развития карстующихся пород, 10 — типы карста: I — открытый, II — покрытый.

плотности болот. То есть для исследуемого региона необходимо учитывать также площадь бессточных впадин при оценке плоскостного смыва.

Средняя высота снежного покрова к концу зимы составляет 0.5–0.6 м. Сопоставляя эту величину с распределением глубин заполнения бессточных впадин (доминирует глубина 1 м), можно сделать вывод, что в подавляющем количестве бессточных впадин снеговой покров не участвует в стоке вод, смыве и выносе материала ни в ионном, ни

во взвешенном состоянии. Здесь следует учитывать еще и тот факт, что 32.4% территории области занято карстующимися породами (см. рис. 4б). При этом выделяется 2 типа карста: открытый и покрытый (задернованный) [14]. Первый тип (цифра I на рис. 4б) характерен для Беломорско-Кулойского плато. В областях развития открытого карста склоновый сток поглощается карстовыми воронками, повышая тем самым долю подземного питания. То есть часть стока переводится из поверхностного

Таблица 1. Характеристика и распределение значений углов наклона поверхности для территории Архангельской области

Значение угла наклона, в град.	Количество ячеек	Занимаемая площадь		Характеристика	Эрозионные процессы
		км ²	%		
менее 2	236369890	402853.71	68.58252	Не относятся к склонам	Отсутствуют
2–4	83418732	142173.55	24.20387	Очень пологие	Образование мелких оврагов и борозд
4–8	23399951	39881.38	6.78948	Пологие	Образование более крупных оврагов и борозд
8–15	1424129	2427.19	0.41321	Средней крутизны	Плоскостной смыв почвенного покрова
15–35	37495	63.90	0.01088	Крутые	Гравитационные процессы и выветривание
35 и более	152	0.26	0.00004	Очень крутые	Гравитационные процессы, выветривание и денудация
Всего	344650349	587400.00	100.00		

в подземный вместе с содержащимися в нем загрязняющими веществами. В областях покрытого карста (цифра II на рис. 4б) осадки частично аккумулируются в понижениях рельефа.

Рассмотрим склоновые зоны размыва и транзита материала (см. рис. 3). В табл. 1 приведена статистика значений углов наклона, рассчитанная на ЦМР с разрешением 1 угловая секунда (30×30 м), классификация склонов приведена по Н.И. Николаеву [17].

В целом доля углов наклона поверхности в интервале $< 8^\circ$ составляет более 90%, и с ними связано образование борозд и мелких оврагов. Доля углов наклона, с которыми, теоретически, связаны процессы плоскостного смыва почвенного покрова (от 8 до 15°), составляет всего 0.4%. Они, как правило, приурочены к долинам рек плато, в первую очередь Беломорско-Кулойского плато, в которых формируются своеобразные геохимические обстановки. Склонов, на которых возможно гравитационное оползание грунтов ($> 15^\circ$) на территории области всего 0.01%. Значения углов наклона меняются вдоль водотоков, и в этом случае они являются относительно локальным параметром. На более детальном уровне в пределах склоновых форм были

выделены локальные участки аккумуляции осадков по значениям профильной кривизны [4].

Затем были рассчитаны водосборные бассейны (в их геоморфометрическом значении) крупных рек региона: Северной Двины, Онеги, Пинеги, Мезени (рис. 5). Бассейны рассчитывались в территориальных границах Архангельской обл. и отдельно для каждой из четырех рек. Несмотря на то, что р. Пинега является притоком Северной Двины, ее бассейны были разделены, поскольку они отличаются порядком водотоков (для Пинеги порядок 8, Северной Двины — 10) и источниками питания. Для Пинеги характерна большая доля подземного питания за счет развития открытого карста. Речная вода здесь имеет гидрокарбонатный состав и формируется под действием химического выветривания коренных карбонатных пород палеозоя.

В целом, площади водосборных бассейнов (по данным цифрового моделирования) вышеперечисленных рек меньше, чем площади бассейнов в их классическом варианте (табл. 2), что вполне закономерно, учитывая методы расчета. Исключение составляют реки Онега и Пинега, их водосборные бассейны практически совпадают с бровками их долин.

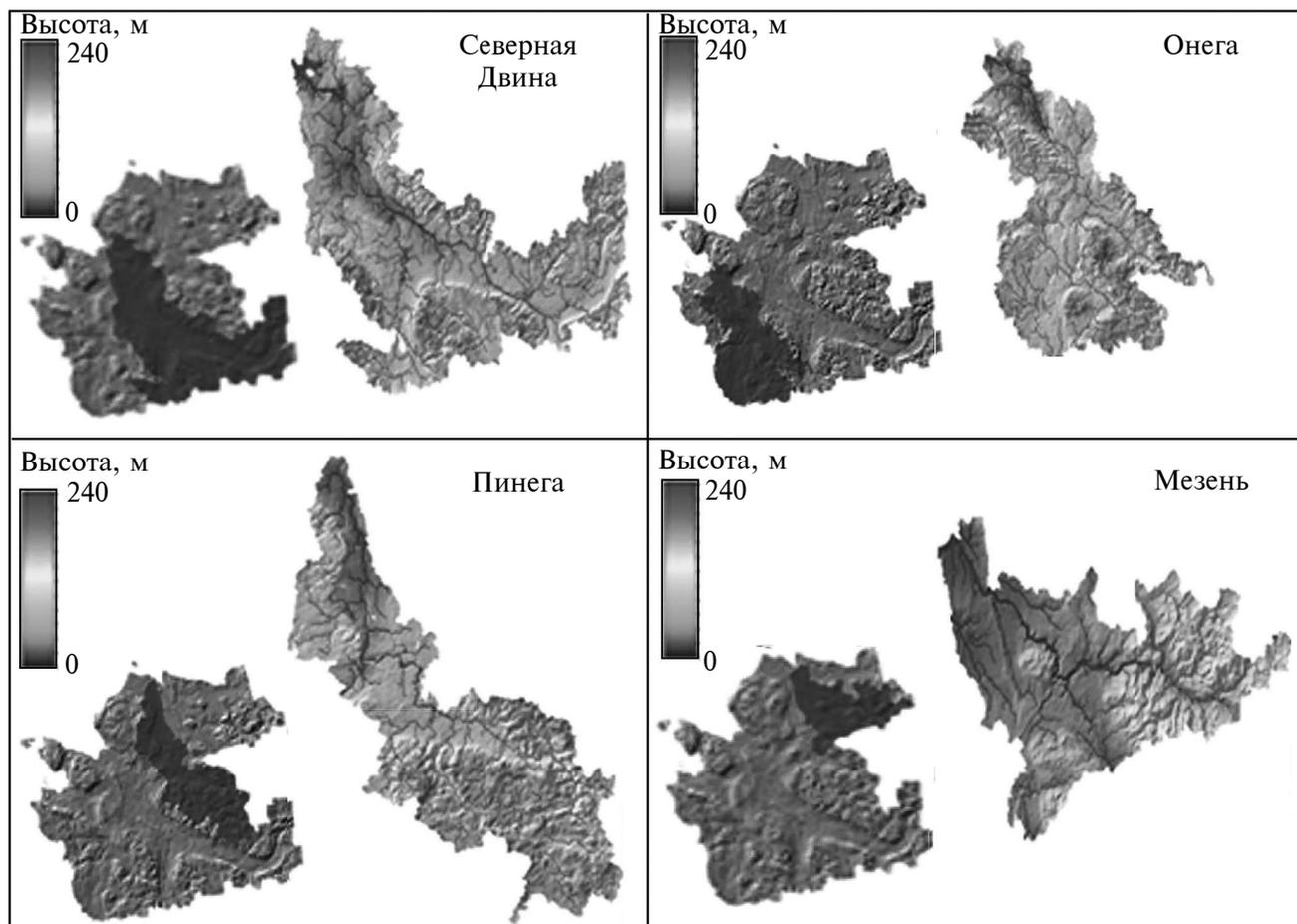


Рис. 5. Схемы основных водосборных бассейнов рек по данным цифрового моделирования.

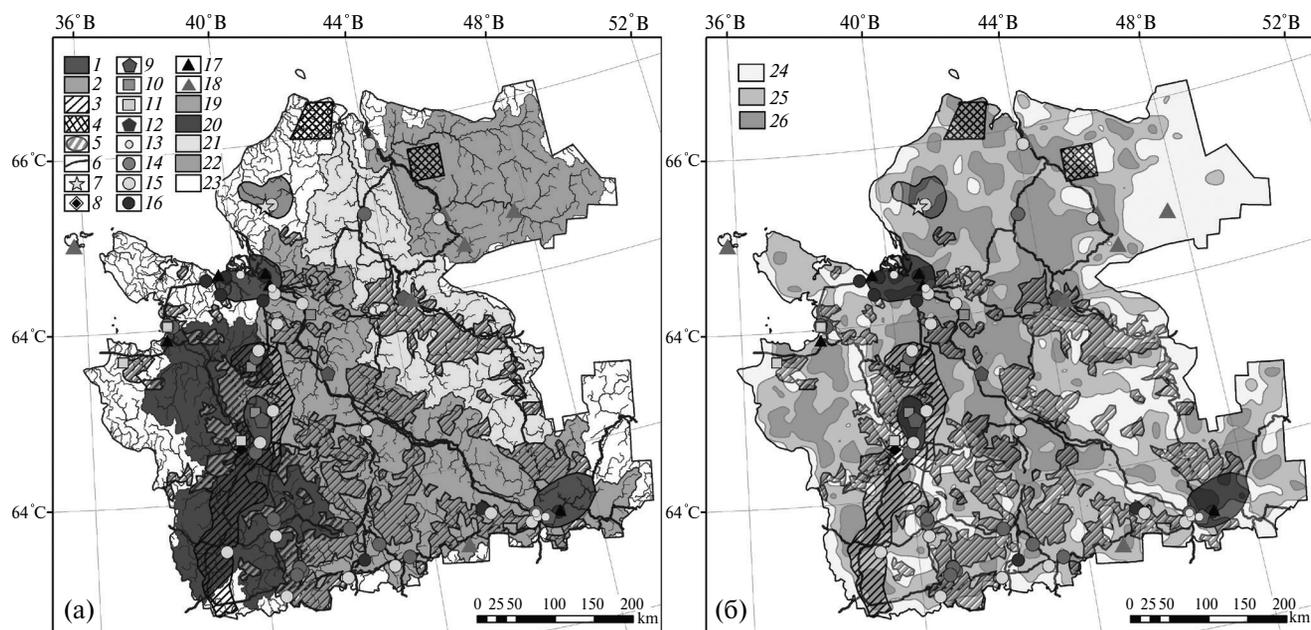


Рис. 6. Схемы сопоставления источников антропогенного воздействия на природную среду Архангельской обл.: а — с бассейнами крупных рек, б — с кластерными значениями плотности бессточных впадин. 1–5 — зоны: 1 — интенсивного промышленного воздействия; 2 — горнодобывающие; 3 — воздействия космодрома; 4 — сброса отработанных ступеней ракет; 5 — лесопромышленного воздействия; 6 — дороги общего и федерального пользования; 7–14 — месторождения: 7 — алмазов, 8 — бокситов, 9 — гипсов, 10 — известняков, 11 — строительных камней, 12 — глин, 13 — песков, 14 — песчано-гравийного материала, 15 — пресных подземных вод, 16 — минеральных подземных вод; 17 — ТЭЦ; 18 — крупные дизельные электростанции; 19–23 — бассейны рек: 19 — Северной Двины, 20 — Онеги, 21 — Пинеги, 22 — Мезени, 23 — всех остальных; 24–26 — кластерные значения плотности бессточных впадин: 24 — минимальные, 25 — средние, 26 — максимальные.

Речные долины в зависимости от ряда параметров (геологический возраст, тектонические движения, состав слагающих их горных пород и их физико-механические свойства) имеют различные продольные уклоны и очертания в плане и поперечном разрезе. Анализ крупных рек региона показал, что их склоны и водосборные бассейны отличаются друг от друга по вышеперечисленным факторам. Поэтому было проведено сопоставление бассейнов этих рек по следующим геоморфометрическим

параметрам: площадь бассейна, общая длина водотоков, среднее значение индекса влажности, среднее значение индекса расчлененности рельефа, среднее значение LS-фактора, результаты представлены в табл. 2 по [4] с дополнениями.

Индекс потенциала плоскостной эрозии (LS-фактор), показывает, чем выше значения данного параметра, тем больше выражено влияние рельефа на процессы водной эрозии (плоскостного

Таблица 2. Общие и геоморфометрические параметры водосборных бассейнов крупных рек Архангельской области

Параметр	Бассейны рек			
	Северная Двина	Онега	Пинега	Мезень
Площадь водосборного бассейна, км ² общая* / в пределах области	357000 / 103964	56900 / 51654	42000 / 42000	78000 / 33030
Протяженность, км, общая* / в пределах области	744 / 606	476 / 416	779 / 779	966 / 710
Объем среднегодового стока*, км ³	109	18.8	13	28
Порядок водотока по методике Стралера (1 — минимальный, 10 — максимальный)	10	9	8	9
Среднее значение LS-фактора	0.0042	0.0037	0.0052	0.0039
Среднее значение индекса расчлененности рельефа	4.93	4.50	6.00	4.62
Среднее значение индекса влажности	–0.082	0.066	–0.329	0.046

* по данным с сайта <https://textual.ru/gvr/>

смыва) [22, 24]. Согласно средним значениям данного параметра, в бассейнах Северной Двины и Пинеги более развита плоскостная эрозия, чем в бассейнах Онеги и Мезени.

Индекс расчлененности рельефа характеризует степень изрезанности территории [23]. Средние значения этого параметра показывают, что наиболее разнороден рельеф в бассейне Пинеги (здесь развиты разнообразные формы карстового рельефа).

Топографический индекс влажности является показателем гидроморфности территории, т.е. склонности ее к накоплению или отторжению воды [21]. В геоэкологических исследованиях топографический индекс влажности позволяет выделять площади преимущественного накопления осадочного материала. Средние значения данного параметра позволяют сделать вывод, что в бассейнах Онеги (повышенная плотность болот) и Мезени (повышенная плотность бессточных впадин) преобладают аккумулятивные процессы, а в бассейнах Северной Двины и Пинеги — процессы смыва и транзита и, как следствие, переноса загрязняющих веществ до геохимического барьера на уровне устья Северной Двины — Двинского залива Белого моря.

Авторами было проведено сопоставление основных источников антропогенного воздействия на природную среду региона, взятыми из проекта “Схема территориального планирования Архангельской области” (URL: <https://dvinaland.ru/gov/iogv/minstroy/shemes/>) со схемами бассейнового районирования и кластерных значений плотности бессточных впадин (рис. 6).

В результате сопоставления данных можно констатировать пространственное совпадение источников антропогенного воздействия на окружающую среду с зоной аккумуляции, выделенной по ЦМР Архангельской обл. на основе расчета геоморфометрических параметров [12]. Воздействие промышленных предприятий происходит за счет сброса загрязненных вод в реки региона или в результате аварийных предприятий и однозначно коррелирует с местоположением предприятий и агломераций.

Вклад сельскохозяйственных угодий и пашен в регионе не является значимым, так как площадь их составляет суммарно только 2.5%, причем из них только 0.5% подвержено эрозионным процессам. Из всех сельхозугодий 55% приходится на сенокосы и пастбища. Сельскохозяйственные предприятия области преимущественно расположены в пойме Северной Двины и ее притоков и мало влияют на снос материала.

Иначе обстоит дело с лесозаготовками и транспортировкой древесины, приуроченными к водосборным бассейнам рек. Сопоставление материалов показало приуроченность зон лесопромышленного

воздействия (лесозаготовка и транспортировка древесины) к природным зонам сноса и, в большей степени, транзита материала [12].

Основной вид воздействия при лесохозяйственной деятельности — нарушение целостности почвенно-растительного покрова [12], что, в свою очередь, влечет за собой активизацию склоновых процессов, и, как следствие, повышенный вынос взвешенного материала в водотоки.

Таким образом, по р. Северная Двина происходит основной вынос поллютантов в бассейн Белого моря, что связано как с большой площадью водосбора, так и с расположением по ее берегам основных промышленных объектов. Немалый вклад вносят и природные процессы, обусловленные геологическим строением и рельефом территории, что подтверждается рассчитанными значениями геоморфометрических параметров. Причем в водосборном бассейне Северной Двины преобладает плоскостной смыв.

Территория водосбора р. Онега является аккумулятором загрязнения в регионе. Это подтверждается и максимальным количеством бессточных накопителей здесь, в качестве которых выступают болота с застойными водами и карстовые понижения в рельефе. В меньшей степени процесс аккумуляции характерен и для водосборного бассейна р. Мезень, но здесь он обусловлен большей плотностью бессточных впадин.

ВЫВОДЫ

Рассмотрена восточная (Архангельская) часть водосборного бассейна Белого моря на примере наиболее крупных рек региона — Северной Двины, Онеги, Пинеги и Мезени. Анализ источников загрязнения на глобальном (Европейский центр дестабилизации окружающей среды), региональном (Кольский промышленный узел) и локальном уровнях (предприятия Архангельской области) показал, что регион является реципиентом загрязнения. Основным путем переноса загрязняющих веществ является атмосферный, который в дальнейшем трансформируется в водный перенос во время паводков. На локальном уровне перенос осуществляется за счет стока вод. Во всех вышеперечисленных вариантах характер рельефа играет доминирующую роль в перераспределении загрязнения. Каждый из вышеперечисленных видов переноса может быть учтен и оценен при расчете геоморфометрических параметров рельефа.

Геоморфометрические параметры, рассчитываемые на основе цифровой модели рельефа, количественно демонстрируют потенциальную предрасположенность территории к сносу, транзиту и накоплению осадочного материала. Показана высокая роль бессточных впадин как приемников и накопителей загрязнения при расчете стока

в поверхностные и подземные воды и переносе материала как в ионной, так и во взвешенной форме. На основе расчета таких параметров, как топографический индекс влажности, индекс расчлененности рельефа, LS-фактор сделан вывод о том, что в бассейнах крупных рек Северная Двина и Пинега преобладают процессы смыва и транзита, и, как следствие, переноса загрязняющих веществ. А в бассейнах рек Онега и Мезень преимущественно развиты процессы аккумуляции осадочного материала.

При планировании и осуществлении хозяйственной деятельности с целью сохранения качества водных объектов, помимо охранных и мониторинговых мероприятий, целесообразно применение геоморфометрического подхода, как объективного количественного инструмента оценки территории.

Исследования проведены в рамках государственного задания № 122011300380-5 Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Булавина А. С. Районирование водосбора Белого моря по степени воздействия материкового стока на морскую водную среду // Вестник МГТУ. 2018. Т. 21. № 1. С. 117–127. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2018-21-1-117-127>
- Георгиади А. Г., Даниленко А. О. Многолетние изменения водного и ионного стока Северной Двины и Печоры // Вестник РФФИ. 2022. № 3–4. С. 103–114. <https://doi.org/10.22204/2410-4639-2022-115-116-03-04-103-121>
- Зверев В. П. Подземные воды земной коры и геологические процессы. М.: Научный мир, 2006. 256 с.
- 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 геоэкологического районирования (на примере Архангельской области). Пенза: Социосфера, 2019. 176 с.
- Лосев К. С. Экологические проблемы и перспективы устойчивого развития России в XXI веке. М.: Космосинформ, 2001. 399 с.
- 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. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-58-67>
- Михайлов В. Н., Добролюбов С. А. Гидрология: учебник для ВУЗов. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2017. 752 с.
- О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ им. М. В. Ломоносова, 2022. 684 с.
- Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б. 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. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127>
- Полякова Е. В. Геоморфометрический подход в геоэкологических исследованиях северных территорий страны // Успехи современного естествознания. 2018. № 3. С. 117–122. <https://doi.org/10.17513/use.36712>
- Полякова Е. В. Учет геоморфометрических параметров рельефа при ведении хозяйственной деятельности на территории Архангельской области // Евразийский союз ученых. 2019. № 3–2(60). С. 33–37. <https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2019.2.60.33-37>
- Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б. Применение геоморфометрического анализа рельефа при осуществлении хозяйственной деятельности на территории Архангельской области // Геоэкология. 2021. № 2. С. 86–95. <https://doi.org/10.31857/S0869780921020065>
- Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б. Цифровое моделирование рельефа в оценке вероятности развития эрозионных процессов в северных регионах страны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 95–104. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-1-95-104>
- Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б., Беленович Т. Я. Применение глобальной цифровой модели рельефа ASTER GDEM v2 для выделения районов возможной активизации карстовых процессов на территории Архангельской области // Ученые записки Казанского университета. Сер. Естественные науки. 2021. Т. 163. № 2. С. 302–319. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2021.2.302-319>
- Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б., Минеев А. Л. Алгоритм расчёта базисных поверхностей на основе цифровой модели рельефа в программном обеспечении SAGA GIS (на примере Архангельской области) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 104–115. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-3-104-115>
- Руш Е. А. Анализ методов геоэкологической оценки природно-техногенных систем // Экология промышленного производства. 2006. № 3. С. 2–8
- Рычагов Г. И. Общая геоморфология. М.: Наука, 2006. 416 с.
- Система Белого моря. Т. 1. Природная среда водосбора Белого моря. М.: Научный мир, 2010. 480 с.
- Трубицина О. П. Кислотно-щелочные особенности осадков прибрежной зоны Архангельской области: ретроспективный анализ // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Сер. Естественные науки. 2016. № 4. С. 17–25. <https://doi.org/10.17238/issn2227-6572.2016.4.17>
- Филатов Н. Н., Тержевик А. Ю. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 335 с.

21. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications / T. Hengl, H. I. Reuter (Eds.). Amsterdam, Elsevier. 2009. 796 p.
22. Moore I. D., Grayson R. B., Ladson A. R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications // *Hydrological Processes*. 1991. V. 5(1). P. 3–30.
23. Reily Shawn J., DeGloria Stephen D., Elliot R. A Terrain Ruggedness Index That Quantifies Topographic Heterogeneity // *Int. Journal of Science*. 1999. V. 5 (1–4). P. 23–27.
24. Wang L., Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modeling // *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 2006. V. 20. № 2. P. 193–213. <https://doi.org/10.1080/13658810500433453>

GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF WATER BODIES IN THE DRAINAGE BASIN OF THE WHITE SEA BASED ON GEOMORPHOMETRIC ANALYSIS OF THE RELIEF

E. V. Polyakova^{a, #}, Yu. G. Kutinov^a, Z. B. Chistova^a, A. L. Mineev^a

^a*Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural branch RAS,
Nikolskii prospect 20, Arkhangelsk, 163020 Russia*

[#]*E-mail: lenpo26@yandex.ru*

In the article, the authors considered the eastern part of the White Sea drainage basin within the administrative boundaries of the Arkhangelsk region. The aim of the study was to assess the potential predisposition of the main rivers in the Arkhangelsk region to the drift and accumulation of sedimentary material (including polluting material) based on the calculation of the geomorphometric parameters of the relief. Analysis of pollution sources at the global (European Center for Environmental Destabilization), regional (Kola industry) and local levels (enterprises of the Arkhangelsk region) showed that the region is a recipient of pollution. The main route of pollutant transport is atmospheric, which is further transformed during floods. At the local level, the transfer is carried out due to the runoff of water. In all of the above options, the nature of the relief has a dominant role in the redistribution of pollution. Each type of transport can be taken into account and evaluated when calculating the geomorphometric parameters of the relief, which quantitatively demonstrate the potential predisposition of the territory to the drift, transit and accumulation of sedimentary material. The high role of drainless depressions as receivers and accumulators of pollution in the calculation of runoff into surface and groundwater and the transfer of material, both in ionic and suspended form, is shown. Based on the calculation of such parameters as Topographic Wetness Index (TWI), Terrain Ruggedness Index (TRI), LS factor, it was concluded that in the basins of such large rivers of the Arkhangelsk region as the Northern Dvina and Pinega, the processes of washout and transit, and, as a result, the pollution transfer prevail. In the basins of the Onega and Mezen rivers, accumulation of sedimentary material is predominant.

Keywords: *river drainage basins, catchment area, digital elevation model, geomorphometric relief parameters, Arkhangelsk region*

REFERENCES

1. Bulavina, A.S. [Zoning of water catchment area of the White Sea by the degree of continental runoff impact on the seawater environment]. *Vestnik MGTU*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 117–127. (in Russian) <https://doi.org/10.21443/1560-2018-21-1-117-127>
2. Georgiadi, A.G., Danilenko, A.O. [Perennial changes in water and ionic runoff of the Severnaya Dvina and Pechora rivers]. *Vestnik RFFI*, 2022, no. 3–4, pp. 103–114. (in Russian) <https://doi.org/10.22204/2410-4639-2022-115-116-03-04-103-121>
3. Zverev, V.P. [Subsurface water in the Earth crust and geological processes]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2006, 256 p. (in Russian)
4. Kutinov, Yu.G., Mineev, A.L., Polyakova E.V., Chistova, Z.B. [Choice of basic digital model of relief (DMR) for north Eurasian plains and its adjustment to geocological zoning (by the example of the Arkhangelsk region)]. Penza, Sotsiosfera Publ., 2019, 176 p. (in Russian)
5. Losev, K.S. [Ecological problems and prospects for the sustainable development of Russia in the 21st century]. Moscow, Kosmoinform Publ., 2001, 399 p. (in Russian)
6. Mineev, A.L., Polyakova E.V., Kutinov, Yu.G., Chistova Z.B. [Reliability of digital model of relief of the Arkhangelsk region for conducting geocological research]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, vol.15, no.4, pp. 58–67. (in Russian) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-58-67>
7. Mikhailov, V.N., Dobrolyubov, S.A. [Hydrology. Textbook for the higher school]. Moscow, Berlin. Direct-Media Publ., 2017, 752 p. (in Russian)
8. [On the state and conservation of the environment in the Russian Federation in 2021. State report]. Moscow, Ministry of Natural Resources of Russian Federation,

- Lomonosov Moscow State University, 2022, 684 p. (in Russian)
9. Polyakova, E.V., Kutinov, Yu.G., Mineev, A.L., Chistova, Z.B. [Analysis of applicability of digital relief models ASTER GDEM v2 and ArcticDEM to the study of the Russian Arctic areas]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, vol. 17, no. 7, pp. 117–127. (in Russian) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127>
 10. Polyakova, E.V. [Geomorphometric approach to geocological research of the northern regions of Russia]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2018, no. 3, pp. 117–122. (in Russian) <https://doi.org/10.17513/use.36712>
 11. Polyakova, E.V. [Consideration of geomorphometric relief parameters upon economic activities in the Arkhangelsk region]. *Evrasiiskii soyuz uchenykh*, 2019, no. 3–2(60), pp. 33–37. (in Russian) <https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2019.2.60.33-37>
 12. Polyakova, E.V., Kutinov, Yu.G., Mineev, A.L., Chistova, Z.B. [Application of geomorphometric analysis of relief upon conducting economic activity in Arkhangelsk region]. *Geoekologiya*, 2021, no. 2, pp. 86–95. (in Russian) <https://doi.org/10.31857/S0869780921020065>
 13. Polyakova, E.V., Kutinov, Yu.G., Mineev, A.L., Chistova, Z.B. [Digital modeling of relief in assessing the probability of erosion development in the northern regions of Russia] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, vol. 16, no. 1, pp. 95–104. (in Russian) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-1-95-104>
 14. Polyakova, E.V., Kutinov, Yu.G., Mineev, A.L., Chistova, Z.B., Belenovich, T.Ya. [Application of digital model of relief ASTER GDEM v2 for outlining areas of possible karst development in the territory of Arkhangelsk region]. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Ser. Estestvennyye nauki*, 2021, vol. 163, no. 2, pp. 302–319. (in Russian) <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2021.2.302-319>
 15. Polyakova, E.V., Kutinov, Yu.G., Chistova, Z.B., Mineev, A.L. [Algorithm of calculating basis surfaces in the digital relief model with SAGA GIS software (by the example of the Arkhangelsk region)]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, vol. 20, no. 3, pp.104–115. (in Russian) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-3-104-115>
 16. Rush, E.A. [Analysis of methods of geocological assessment of natural-anthropogenic systems]. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*, 2006, no. 3, pp. 2–8 (in Russian)
 17. Rychagov, G.I. [General geomorphology]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 416 p. (in Russian)
 18. [The White Sea system. Vol. 1. The water drainage environment of the White Sea]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2010, 480 p. (in Russian)
 19. Trubitsina, O.P. [Acidic-alkaline specifics of sediments in the coastal zone of the Arkhangelsk region: a retrospective analysis]. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Ser. Estestvennyye nauki*, 2016, no. 4, pp. 17–25. (in Russian) <https://doi.org/10.17238/issn2227-6572.2016.4.17>
 20. Filatov, N.N., Terzhevik, A.Yu. [The White Sea and its catchment area under the effect of climatic and anthropogenic factors]. Petrozavodsk, Karelia Research Centre RAS, 2007, 335 p. (in Russian)
 21. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Hengl T., Reuter H. I. (Eds.). Amsterdam, Elsevier. 2009. 796 p.
 22. Moore, I.D., Grayson, R.B., Ladson, A.R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrological processes*, 1991, vol. 5(1), pp. 3–30.
 23. Reily Shawn J., DeGloria Stephen D., Elliot Robert. A Terrain Ruggedness Index That Quantifies Topographic Heterogeneity. *Int. Journal of Science*, 1999, vol. 5(1–4), pp. 23–27.
 24. Wang, L., Liu, H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modeling. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, 2006, vol. 20, no. 2, pp. 193–213. <https://doi.org/10.1080/13658810500433453>