

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт космических и информационных технологий
Базовая кафедра геоинформационных систем

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

_____ А.А. Гостева
подпись

« _____ » _____ 2021 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Анализ влияния изменения лесного покрова речных бассейнов на
климатические и гидрологические характеристики в облачных ГИС
09.04.02 Информационные системы и технологии
09.04.02.06 Дистанционное зондирование и ГИС-технологии в
мониторинге природных и антропогенных экосистем

Научный руководитель _____ зав. кафедрой, к.т.н. А.А. Гостева
подпись, дата

Выпускник КИ19-02-6М 031943301 _____ Е.В. Федотова

Рецензент _____ с.н.с., к.т.н. М.Г. Ерунова
подпись, дата

Нормоконтролер _____ А.А. Гостева
подпись, дата

Красноярск 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Пространственные характеристики водосборного бассейна.....	6
1.1 Определение речного бассейна	6
1.2 Лесистость как характеристика бассейна реки.....	6
1.3 Связь лесистости с гидрологическим режимом бассейнов	9
2 Исходные данные и используемое программное обеспечение	17
2.1 Цифровая модель рельефа MERIT Hydro – MERIT Hydrologically Adjusted Elevations.....	17
2.2 Данные SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales (HydroSHEDS) .	17
2.2.1 Данные GloRiC	18
2.2.2 Данные HydroATLAS	20
2.3 Карты растительного покрова.....	21
2.4 Данные по эвапотранспирации в продукте MOD16.....	24
2.5 Данные о горях в продукте MOD16	25
2.6 Данные о климате ERA5.....	25
2.6.1 База данных ERA5-Land monthly averaged - ECMWF climate reanalysis	25
2.6.2 Набор данных GLDAS-2.1: Global Land Data Assimilation System ...	26
2.6.3 База данных ERA5 Monthly aggregates - Latest climate reanalysis produced by ECMWF / Copernicus Climate Change Service.....	26
2.6.4 Данные о динамике лесного покрова.....	28
2.7 Используемое программное обеспечение	29
2.7.1 Программный продукт ArcGIS	29
2.7.2 Программный продукт QGIS	30
2.7.3 Программа Whitebox GAT.....	30
2.7.4 Облачная среда Google EarthEngine	30
3 Создание тематических карт многолетних средних климатических и гидрологических характеристик бассейнов рек Красноярского края	32
3.1 Тематическое содержание карт	32
3.2 Результаты обработки и визуализация данных дистанционного зондирования продукта MOD16 эвапотранспирация.....	33
3.3 Построение бассейнов рек для анализа динамики климатических и гидрологических характеристик.....	35
4 АНАЛИЗ ДАННЫХ В GOOGLE EARTH ENGINE	39
4.1 Извлечение значений по маскам.....	39
4.1.1 Получение средних месячных значений для бассейнов	39
4.1.2 Извлечение данных в отдельных пикселях	40
4.1.3 Создание маски растровыми данными	40
4.2 Визуализация снимков Landsat и Sentinel-2	40
4.3 Программы вычисления средних значений за период, суммарных за период, трендов и их визуализация.....	41
4.3.1 Общий подход	41

4.3.2 Вычисление суммы значений пикселей в коллекции	42
4.4 Вычисление коэффициентов линейного тренда	43
5 Анализ пространственного распределения и временной динамики климатических и гидрологических параметров территорий	45
5.1 Динамика климатико-гидрологических параметров в бассейнах рек Бузим, Малый Кемчуг и Кача	45
5.1.1 Динамика средних значений параметров	45
5.1.2 Сравнительный анализ параметров.....	47
5.1.3 Анализ данных в отдельных пикселях, соответствующих территориям с разными характеристиками растительного покрова	49
5.2 Исследование динамики гидрологических показателей в бассейнах рек с существенными изменениями лесного покрова	51
5.3 Динамика климатических параметров на горах в Эвенкии	56
Заключение	58
Список использованных источников	60
Приложение А. Слои в наборе данных ERA5-Land	64
Приложение Б. Карты ландшафтно-климатических и гидрологических параметров бассейнов рек Красноярского края.....	72
Приложение В. Данные о динамике лесной площади бассейнов с 2000 года	75
Приложение Г. Листинги программного кода в облачной среде EarthEngine для извлечения и визуализации данных	76
Приложение Д. Листинг программного кода вычисления суммы значений параметров	81

ВВЕДЕНИЕ

Представление о том, каким образом лес влияет на водный режим территории, свойства и качество водных ресурсов, меняется в связи с проведением новых экспериментальных и теоретических исследований.

В результате многолетних экспериментальных исследований выясняется, как сказываются на водном режиме территории климатические условия в бассейне реки (количество осадков, величина испарения, зависящая от температуры воздуха) и ландшафтные особенности (горная или равнинная территория, географическая зональность, растительность и пр.). В природе существуют физико-географические организации в виде речных бассейнов, и каждую реку не следует рассматривать отдельно от тех площадей, которыми она питается [1].

Именно с началом экспериментов в пределах малых бассейнов связан переход к количественному представлению о роли географических факторов и ландшафтов в формировании гидрологических процессов. Чем мельче бассейн, тем больше роль ландшафтных особенностей бассейна и меньше роль климатических особенностей. Ландшафты речного бассейна являются инвариантом тепла и влаги [2].

В целом можно констатировать, что в исследованиях связи или зависимости гидрологического режима территории от таких факторов, как ландшафтно-географические характеристики, метеорологические условия, растительный покров, активность и характер хозяйственной деятельности, есть много вопросов.

Анализ связи гидрологических параметров речных бассейнов с климатическими и ландшафтными характеристиками требует вовлечения в исследование данных из климатических и гидрологических баз данных, цифровых моделей рельефа, данных дистанционного зондирования и результатов их обработки в виде карт, различных растровых и векторных данных. Это большие объемы данных, которые требуют обработки в специализированных геоинформационных пакетах.

Облачные системы ГИС предлагают для решения таких задач надежные инструменты, реализующие методы геоинформатики, и мощные программно-аппаратные средства: географические серверы с открытым доступом, устройства для формирования электронных карт и алгоритмы многофакторного анализа. Более того, использование облачных технологий позволяет оптимизировать процесс создания локальных ГИС.

В настоящее время рынок представлен рядом компаний, предоставляющих облачные средства работы в геоинформационных сервисах, например:

– ArcGIS Online от компании ESRI, лидера в разработке ПО ГИС различного уровня;

– NextGIS, российская компания, специализирующаяся на разработке программного обеспечения (ПО) и геосервисов на основе открытого ПО;

– Google Earth Engine – облачная платформа для геопространственного анализа данных.

ArcGIS Online – это облачная ГИС-платформа, которая предоставляется как сервис (SaaS). Она дает возможность использовать готовые карты и глобальные сервисы, а также создавать собственные веб-карты, картографические сервисы и приложения. Работает как в открытом режиме «для всех», так и в режиме организации с ролевой системой прав доступа [3].

ООО «NextGIS» – коммерческая компания, которая строит свой бизнес вокруг открытого программного обеспечения, данных и методологий в области геоинформатики. За счет большого количества участников, вовлеченных в процесс разработки, открытые ГИС достигли значительных успехов и продолжают динамически развиваться. NextGIS предоставляет полный комплекс услуг по разработке, внедрению и поддержке ГИС [4].

Облачная платформа Google Earth Engine [5] – это платформа для геопространственного анализа данных глобального масштаба, которая использует огромные вычислительные возможности Google для решения социальных проблем, включая вырубку лесов, засуху, стихийные бедствия, болезни, продовольственную безопасность, управление водными ресурсами, мониторинг климата, защита окружающей среды. Она уникальна как интегрированная платформа, предназначенная для расширения возможностей не только специалистов, занимающихся дистанционным зондированием, но и гораздо более широкой аудитории, которой не хватает технических возможностей, необходимых для использования традиционных суперкомпьютеров или крупномасштабных ресурсов облачных вычислений [6]. Earth Engine – вычислительная среда, геопространственный прикладной программный интерфейс (JavaScript, Python, REST) и интерактивный прикладной сервер, работающие с открытым каталогом данных (несколько петабайтов данных).

Цель диссертационной работы: провести анализ динамики параметров гидрологического режима речных бассейнов в связи с изменением растительного покрова, используя средства работы с климатическими данными и данными дистанционного зондирования в облачной среде Google Earth Engine. Для этого необходимо решить задачи:

- определить факторы, рассматриваемые в литературных источниках как влияющие на гидрологический режим территорий;
- получить данные в облачной среде из баз данных по климату для выбранных территорий;
- разработать программы пространственного анализа данных;
- провести анализ полученных параметров для трех бассейнов рек центральной части Красноярского края;
- провести анализ полученных параметров для территорий с гибелью лесного покрова в результате повреждения насекомыми и пожарами.

1 Пространственные характеристики водосборного бассейна

1.1 Определение речного бассейна

Водосборный бассейн в современных географических, гидрологических, социальных, природоохранных исследованиях считается наиболее естественной единицей деления территории всей планеты. Бассейны реки, озера, моря — одновременно и универсальные, самые распространенные на поверхности суши природные комплексы высокой степени целостности, с четкими границами – водоразделами, и специфические этнодемографические и экономические пространственные структуры [7]. Бассейны – иерархически построенные целостные образования, в которых замыкаются многие виды кругооборота вещества, обособившиеся в четких орографических границах. Речной бассейн представлен в виде многопараметрической системы, элементами которой являются площади развития горных пород с различными фильтрационными свойствами и тектоническими особенностями, а также ландшафтные выделы. Взаимодействие элементов определяет пространственно-временные вариации составляющих водного баланса и химического состава природных вод местного генезиса. На этой основе разработано представление о ландшафтно-гидрологических системах (ЛГС), которые могут быть трансформированы в более частные варианты пространственной организации – стокоформирующие комплексы. Ландшафтные характеристики бассейнов включают площадь, среднюю высоту над у.м., средний уклон, густоту речной сети, длину внешнего водораздела и водоразделов всех порядков в бассейне. Гидрологические характеристики – это среднегодовой слой стока и испарения [8].

1.2 Лесистость как характеристика бассейна реки

Выделяются две функции лесного покрова в отношении гидрологических характеристик территорий:

- водоохранная функция – влияние леса на годовой сток;
- водорегулирующая функция – способность леса переводить поверхностный сток в подземный.

Лесистость – теоретическое понятие, характеризующее площадь территории, занятую лесом, по отношению ко всей территории. Несколько выражений для расчета лесистости известно, например, из [9]:

$$Л = \Sigma(S_{\text{лесных классов}}) / S_{\text{общ}} * 100\% \quad (1)$$

$$ДХ = \Sigma(S_{\text{хвойных классов}}) / \Sigma(S_{\text{лесных классов}}) * 100\% \quad (2)$$

$$ЗП = (S_{\text{псаммофильной растительности}} + S_{\text{несомкнувшихся культур}}) / S_{\text{общ}} * 100\% \quad (3)$$

Для расчета лесистости используются различные способы деления территории: административные районы, сеть квадратов с определенной длиной стороны, квартальная сеть лесничеств и пр. В данной работе лесистость рассматриваются речные бассейны, лесистость определяется по формуле (1) как отношение площади лесной растительности бассейна к его общей площади.

В [9] для национального парка «Куршская коса» предложено использовать лесистость (Л) территории (1) и долю хвойных пород (ДХ) (2) в древостое как универсальные показатели. Для расчета их количественных значений выбрана территориальная единица наблюдения в виде лесохозяйственного квартала. Вычисление разницы между значениями каждого показателя в 2017 и 2007 г. легло в основу составления карт динамики лесистости, доли хвойных, доли развеваемых (открытых) песков и песков, покрытых растительностью (закрепленных песков). Количественно оценены изменения площадных характеристик растительного покрова Куршской косы за 10-летний период в границах квартальной сети с точностью не менее 0.1 га. В качестве показателей динамики для картографирования использованы относительные площадные параметры, характеризующие устойчивость растительного покрова территории полуострова.

В работе [10] проанализированы основные факторы формирования водных ресурсов бассейна р. Салгир и ее притоков. Оценка лесистости проведена по ландшафтным контурам и по сетке квадратов в 25 км².

Для детального анализа закономерностей в изменении лесистости на территории Белгородской области [11] был предложен способ ее картографирования на основе снимков с пространственным разрешением 30 м с последующим усреднением значений в ячейках размером 3 × 3 км, на которые была разбита вся территория региона. После этого была построена картограмма лесистости области, созданная на основе интерполированных значений лесистости каждой ячейки. Исследование включало анализ характеристик лесов для всей Белгородской области и ее административных районов. Анализ выполнялся на двух уровнях: различия в лесистости по административным районам и по участкам площадью 3 × 3 км. Помимо площади учитывалось количество лесных массивов. Анализ лесистости на более детальном уровне путем интерполирования ее значений, усредненных в ячейках размером на местности 3 × 3 км, позволил выделить ареалы повышенной или пониженной лесистости (рисунок 1). Снимки 2000 и 2012-х годов использовались для оценки изменений подстилающей поверхности.

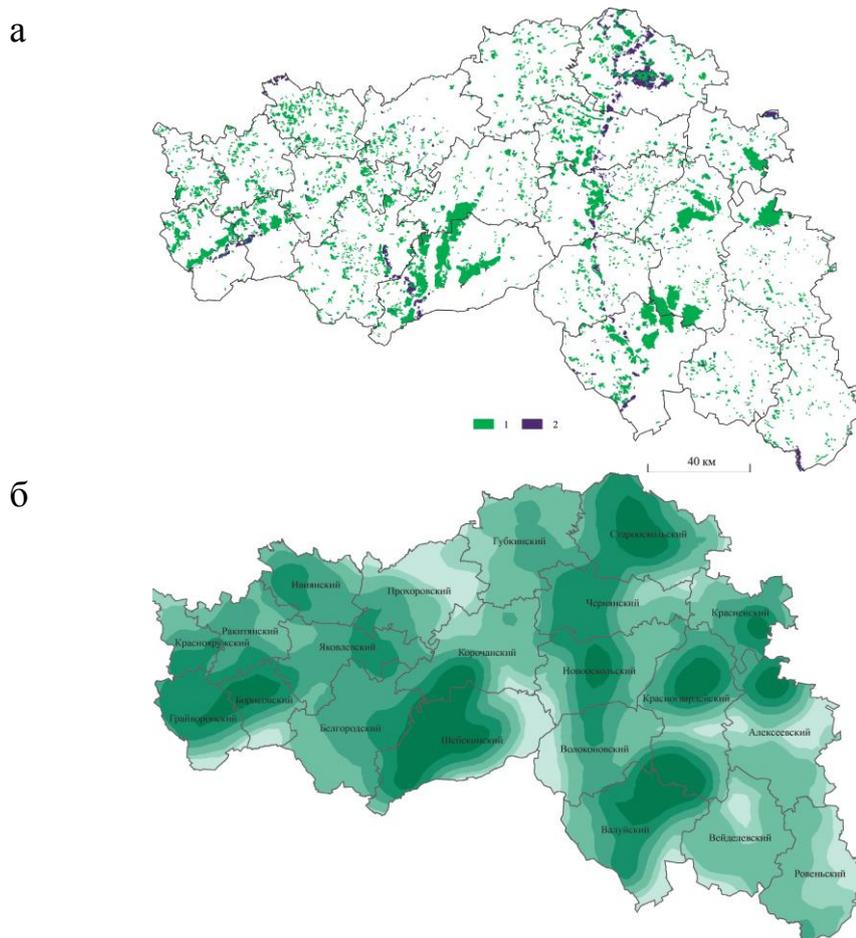


Рисунок 1 – Способы представления информации о лесистости: а – распределение лиственных (1) и хвойных (2) лесов по результатам классификации снимков; б – изолинейная карта лесистости

В исследовании [12] работы по визуальному дешифрированию и расчету вегетационного индекса нормированной разности NDVI проводились по космическому снимку Landsat-8. Были построены изолинейные карты естественной, искусственной и общей лесистости территории тестового полигона, с которыми сравнивалась изолинейная карта значений NDVI. Сопряженный анализ изолинейных карт позволил выявить совпадение контуров общей лесистости территории и NDVI (рисунок 2). Установлено, что при использовании NDVI происходит четкое разделение территории на два ареала, соответствующих облесенным (естественные лесные массивы в пойме) и малооблесенным землям (агроландшафты). По результатам визуального дешифрирования были составлены изолинейные карты лесистости тестового полигона. Для этого на космоснимке выделялись все лесные насаждения, которые предполагалось учесть при оценке лесистости, - естественные байрачные и пойменные леса, искусственные полевозащитные и прибалочные лесные полосы и т.д. Затем на космоснимок накладывалась квадратная сетка (в данном случае – из 28 квадратов, площадь квадрата – 40

км²), и внутри каждого квадрата сетки определялась площадь древесно-кустарниковой растительности. Полученные цифры делились на площадь квадрата и таким образом для каждого из них вычислялся показатель лесистости.

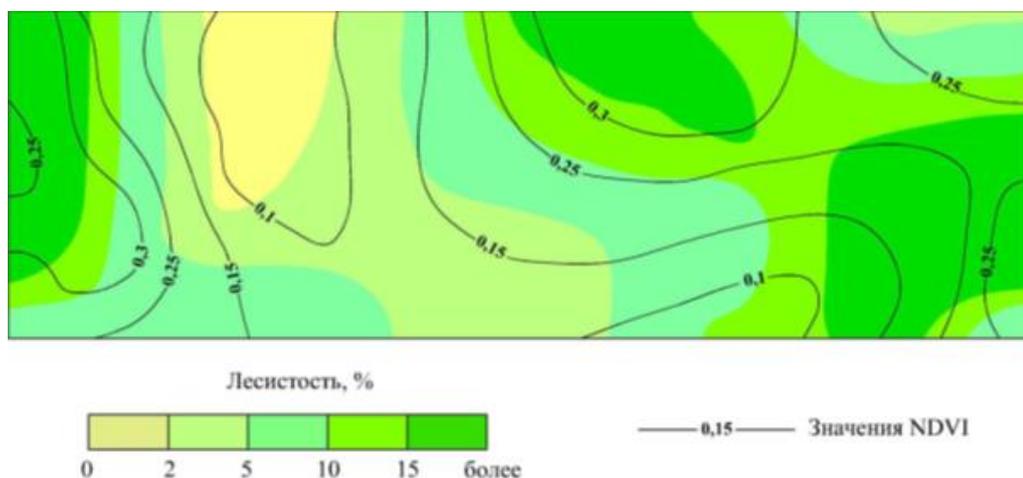


Рисунок 2 – Сопоставление изолинейной карты лесистости, составленной по результатам визуального дешифрирования, и изолинейной карты NDVI

В [13] представлены результаты оценки динамики лесистости на юге лесостепи Среднерусской возвышенности (территория Белгородской области), полученные из анализа детальных архивных и современных спутниковых снимков. Экспериментальные результаты основаны на анализе данных с пяти участков общей площадью 1722 км², репрезентативно отражающих разнообразные физико-географические условия региона. На исследуемой территории в период 1970–2014 гг. установлен рост лесистости на 31% от уровня 1970 г. Отмечен рост мозаичности лесопокрытых земель: возросло количество лесных массивов на 87% и уменьшился средний размер единичного лесного ареала с 13.0 до 9.2 га. На территории Белгородской области в направлении с северо-запада на юго-восток наблюдается тренд снижения средней величины линейного прироста границы лесов. Наибольшие величины продвижения границ лесных ареалов в период 1970–2014 гг. зафиксированы в наиболее влажной западной части региона – 34.3 м, а наименьшие – в наиболее засушливой юго-восточной части – 15.0 м.

1.3 Связь лесистости с гидрологическим режимом бассейнов

Гидрологическая роль леса различается в разных климатических условиях. Отдавая должное климатологической концепции стокоформирования, для криолитозоны Средней Сибири, значительная часть территории которой покрыта лесами, изучение гидрологической роли «холодных» лесов (cool forests) и влияния лесистости на водность рек весьма важна. Актуальность лесогидрологических исследований возрастает в связи с

глобальным изменением климата в районах криолитозоны, оно неоднозначно отражается на многолетних изменениях водных ресурсов, что определяется многими разнонаправленными процессами, комплексное влияние которых сложно прогнозировать [14].

Большое внимание исследованию водного режима и гидрологических характеристик в целом уделяется в Китае. В работе [15] рассматриваются прибрежные пустынные леса в бассейне (в нижнем течении) реки Хуанхэ. В этом исследовании поставлены задачи:

- исследовать как пространственное распределение, так и временные вариации прибрежного леса пустыни Хэйхэ на разных расстояниях от русла реки;

- выяснить влияние пространственной неоднородности свойств почвы и временного изменения наличия воды на растительное сообщество.

Изучены 3000-метровые трансекты, идущие перпендикулярно руслу реки, чтобы охватить различные расстояния от русла реки и отобразить пространственное распределение растительности (например, изменения в флористическом составе, структуре сообщества и разнообразии) вдоль расстояния от русла реки. В то же время использованы вариации NDVI на разных расстояниях от русла реки, полученные из изображений с более высоким разрешением (например, разрешение 30 м) с 2000 по 2014 год, чтобы представить временное изменение растительности. Пространственная неоднородность свойств почвы (например, влажность почвы, физические свойства почвы и питание почвы) и временное изменение наличия воды (например, среднегодовая и годовая изменчивость грунтовых вод, влажность почвы и сток) использовались для объяснения дисперсии растительного сообщества.

Использовались следующие характеристики растительности для деревьев, кустарников и трав: R_{Den} – относительная плотность, R_{Dom} – относительное доминирование, R_H – относительная высота, и R_C – относительное проективное покрытие (coverage). Использовались характеристики влажности почвы на разной глубине. Показана вариабельность этих признаков на разной высоте над у.м.

В настоящее время вопрос о том, уменьшает ли сток в бассейне Желтой реки восстановление растительности, особенно леса, становится спорным [16]. Анализ проводился по реке Вэй, крупнейшему притоку реки Хуанхэ, с покрытой растительностью областью исследования. Применяется широко используемая модель оценки почвы и воды (SWAT) для верхнего и среднего течения бассейна. В модели SWAT использованы ежедневные наблюдаемые метеорологические факторы (1960–2009 гг.), откалиброванные относительно суточных данных 1960–1969 гг.; откалиброванные данные для периода 1970–1979 гг. использовались для анализа данных 1980–2009 гг. Карты динамики подстилающей поверхности (LUCC) были получены из научных организаций, для 1980 и 2005 годов карты были актуализированы с помощью данных MODIS. Карты LUCC представляли 6 типов (лес, кустарники, пастбища, поля,

водные объекты и постройки) и 25 подтипов покрова. Использовались карты пастбищ (1 : 500 000), почвенные карты (1 : 1 000 000), карты типов растительности (1 : 1 000 000), другие данные.

Метеорологические данные были получены из Китайской системы метеорологических данных (<http://www.escience.gov.cn/metdata/page/index.html>) и метеостанций о дождевых осадках. Данные включают атмосферное давление, среднюю (минимальную и максимальную) температуру, давление пара, относительную влажность, количество осадков, скорость ветра, направление ветра и время солнечного сияния.

Обнаружено, что средний сток, оцененный с помощью карты землепользования 2005 года, уменьшился по сравнению со стоком по карте 1980 года, с теми же метеорологическими воздействиями. Особый интерес здесь представляет то, что сток сократился на сельскохозяйственных землях, но увеличился в лесных районах. Точнее говоря, поверхностный сток, сток почвы и общий сток на сельскохозяйственных угодьях уменьшались, тогда как сток почвы и общий сток с лесных площадей увеличивался. Чтобы исследовать это, разработали пять сценариев: (S1) нынешнее землепользование (1980) и (S2) 10%, (S3) 20%, (S4) 40% и (S5) 100% сельскохозяйственных земель, которые переходят в смешанный лес. Обнаружили, что сток постепенно увеличивается при смене сельхозземель на лес примерно на 7,4 мм на 10%. Результаты моделирования показывают, что проведение лесовосстановления оказывает положительное влияние как на поверхностный сток, так и на грунтовый, компенсируя уменьшение поверхностного стока, что приводит к незначительному увеличению стока в реке Вей со смешанными ландшафтами на плато Лесс, которые включают горную местность.

Чтобы интерпретировать противоречивые результаты, утверждалось, что влияние растительности на годовой сток зависит от площади водосбора; отношения между ними были отрицательными в небольших водосборах и положительными в более крупных водосборах. Некоторые считали, что, вероятно, именно большое количество транспирационной воды играло основную роль в гидрологическом процессе, когда водораздел был меньше. Другие считали, что лесные массивы более крупных водосборов могут увеличивать осадки и растительность, а также способствуют инфильтрации осадков, что увеличивает долю подземного стока в лесных районах. Некоторые исследователи указали, что посадка деревьев оказывает как негативное, так и положительное влияние на водные ресурсы и что общий эффект был результатом баланса между ними, который сильно зависел от плотности деревьев. Проницаемость почвы была важным фактором в объяснении того, как два способа облесения (естественная регенерация и посадка) привели к противоположным изменениям в режиме стока. Результаты советских исследований показали, что 48% коэффициентов стока увеличились, 32% не изменились, а 20% уменьшились с увеличением лесистости водосбора. Области с увеличением были расположены в высоких

широтах и влажных областях. В этих условиях общее испарение в лесистых и безлесных районах одинаково. Предполагалось, что снег может быть снесен или в лесистые районы из безлесных районов, что может увеличить коэффициент потока, но эти факторы будут слабее в низких и средних широтах, чем в высоких широтах. Кроме того, растительность может изменить гидрологический цикл следующим образом: перераспределение осадков кронами; ветви, стембель и подстилка стремятся перехватить больше воды в почву; или корни, возможно, обеспечивающие каналы для потока, чтобы проникнуть в грунтовые воды и извлечь почвенную воду в качестве испарения. Следовательно, различные результаты привели к спорным отношениям между растительностью и стоком.

Пример интерполяции осадков представлен на рисунках 3 – 4 [16].

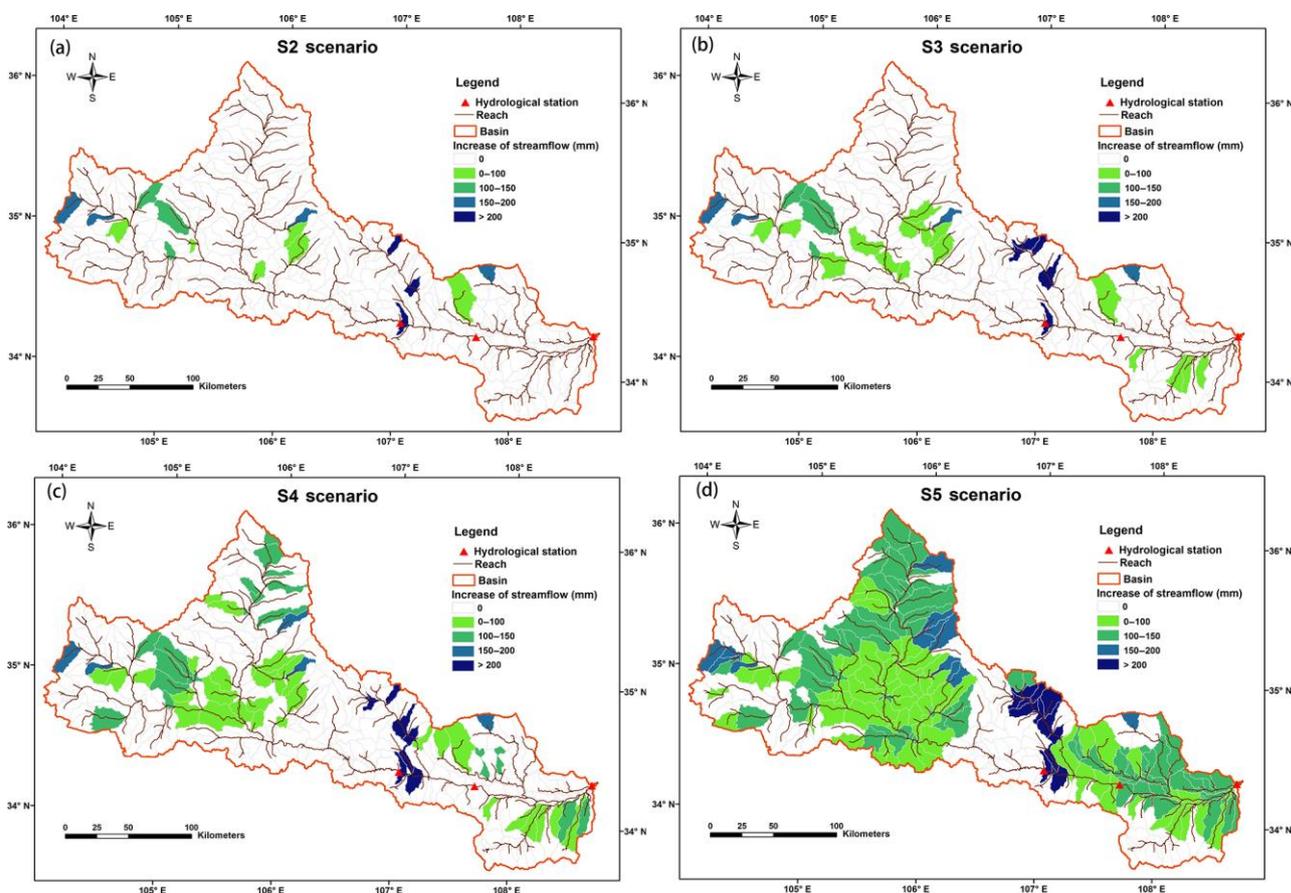


Рисунок 3 – Пространственное распределение изменения годового стока по сценариям S2–S5 по сравнению со сценарием S1

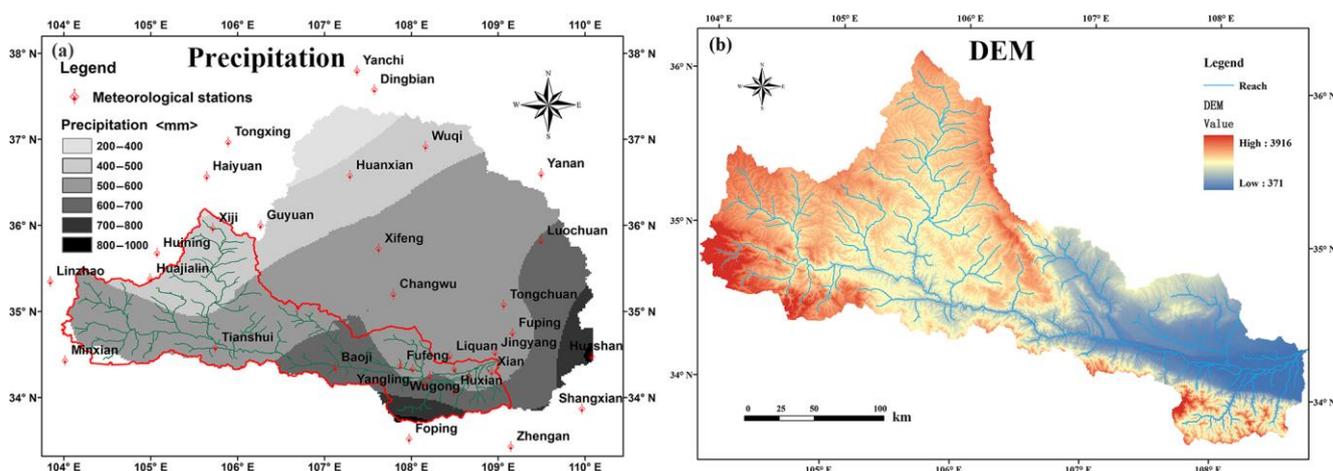


Рисунок 4 – Пространственное распределение годовых осадков в бассейне реки Вэй – усреднение за 55 лет, и ЦМР анализируемой территории

Понимание гидрологических реакций на лесовосстановление является важной темой в управлении водосборным бассейном, особенно в крупных лесных водосборных бассейнах (более 1000 км²) [17]. В этом исследовании выбрали два крупных лесных водосбора (Пинцзян и Сяншуй), расположенных на юго-востоке Китая с площадью 3261,4 и 1458 км², соответственно, а также долгосрочные данные о климате и гидрологии (1954–2006 годы) для оценки влияния крупномасштабного лесовосстановления на сток. Оба водосборных бассейна имеют сходный климат и испытали сопоставимые и драматические изменения лесного покрова в течение последних десятилетий, но с различными свойствами водосборов (например, на водосборе Сяншуй рельеф намного круче, чем в Пинцзяне), что дает уникальную возможность сравнить различия гидрологических режимов в двух контрастных водоразделах. Результаты показали, что восстановление лесов не оказало существенного влияния на средние стоки в обоих водосборах. Тем не менее, лесовосстановление значительно сократило высокие уровни стока в Пинцзяне, но имело ограниченное влияние в Сяншуй. Точно так же лесовосстановление оказало значительное и положительное влияние на низкие стоки (Q95%) в Пинцзяне, в то время как оно существенно не изменило низкие стоки в Сяншуй. Таким образом, гидрологическое восстановление ограничено и медленнее в более крутом водосборном бассейне Сяншуй, подчеркивая, что свойства водосбора также важны для определения гидрологических реакций на лесовосстановление. Этот вывод имеет важное значение для разработки стратегий лесовосстановления и управления водосборами в контексте гидрологического восстановления [17].

Данные индекса листовой поверхности LAI Global LAnd Surface Satellite (GLASS) использовались в качестве показателя площади лесного покрова в исследованных водосборах (продукт GLASS LAI с пространственным разрешением 0,05 градуса и временным разрешением 8 дней для периода с 1981 по 2014 год (<http://www.bnu-datacenter.com/>). Данные GLASS LAI

основывались на значениях LAI с апреля по октябрь для каждого года для водного бассейна были получены путем усреднения данных LAI для пикселей, где более 50% их площади попадают в границы водораздела в течение периода исследования (1957–2006 гг.). Лесной покров значительно сократился в период 1965–1984 гг. из-за крупномасштабного нарушения лесов (например, вырубка лесов). С тех пор лесной покров значительно увеличился с примерно 30% в 1980-х годах до 70% в 2006 году в обоих водосборных бассейнах благодаря реализации проектов по лесовосстановлению (1990–2006 годы). Таким образом, весь исследуемый период был разделен на период нарушения лесов (1957–1985 гг.) и период восстановления лесов (1990–2006 гг.). Хотя последствия лесовозобновления для пиковых стоков по-прежнему противоречивы, общий вывод заключается в том, что увеличение лесного покрова за счет лесовозобновления может уменьшить высокие стоки.

Очень большое внимание гидрологов всего мира уделяется исследованиям в бассейне реки Амазонка [18]. Ожидается, что вырубка лесов в Амазонии уменьшит суммарное испарение, то есть эвапотранспирацию (ЕТ), и увеличит влажность почвы и речной сток. Масштабы и знак реакции ЕТ на обезлесение зависят как от величины, так и от региональных особенностей изменения земного покрова (Land cover change, LCC), а также от изменения климата и уровней CO₂. С одной стороны, повышенный уровень CO₂ снижает транспирацию в масштабе листьев, но этот эффект может быть компенсирован увеличением плотности листовой зоны. Используя три региональных сценария LCC, специально разработанных для бразильской и боливийской Амазонки, исследовалось влияние изменения климата и обезлесения на гидрологию бассейна Амазонки в этом столетии, взяв за основу 2009 год. Для каждого сценария LCC взяты три модели поверхности (LSM), LPJmLDGVM (Германия), INLAND-DGVM и ORCHIDEE (Франция), работающие по трем сценариям изменения климата, имитируемого тремя моделями общей циркуляции (GCM) из 4-го Оценочного доклада МГЭИК (AR4). В среднем по бассейну Амазонки без обезлесения результаты GCM указывают на повышение температуры на 3,3°C к 2100 году, что увеличивает испарение, в результате чего количество осадков увеличивается на 8,5%. В случае отсутствия вырубки леса ЕТ и сток увеличиваются на 5,0 и 14% соответственно. Однако в юго-восточной Амазонии количество осадков уменьшается на 10% в конце сухого сезона, и три LSM приводят к уменьшению ЕТ на 6%, что меньше, чем количество осадков, поэтому сток уменьшается на 22%. Например, минимальный речной сток реки Рио Тапажос в 2100 году сократится на 31% [18].

Чтобы изучить дополнительный эффект обезлесения, определили для LSM три контрастных сценария LCC, с уменьшением количества лесов в этом столетии от 7 до 34%. Все три сценария частично компенсируют вызванное климатом увеличение ЕТ (меньше леса – меньше суммарное испарение), и сток увеличивается по всей Амазонке. На юго-востоке, однако, вырубка лесов усиливает уменьшение ЕТ в конце сухого сезона, приводя к значительному

увеличению стока (до 27% в случае экстремальной вырубке лесов), компенсируя отрицательный эффект изменения климата, таким образом уравновешивая уменьшение низких потоков в Рио Тапажос. Эти прогнозы связаны с большими неопределенностями, которые мы приписываем отдельно различиям в LSM, GCM и неопределенному диапазону обезлесения [18]. Таким образом, гидрологическую роль леса видят по-разному в разных частях бассейна (рисунок 5).

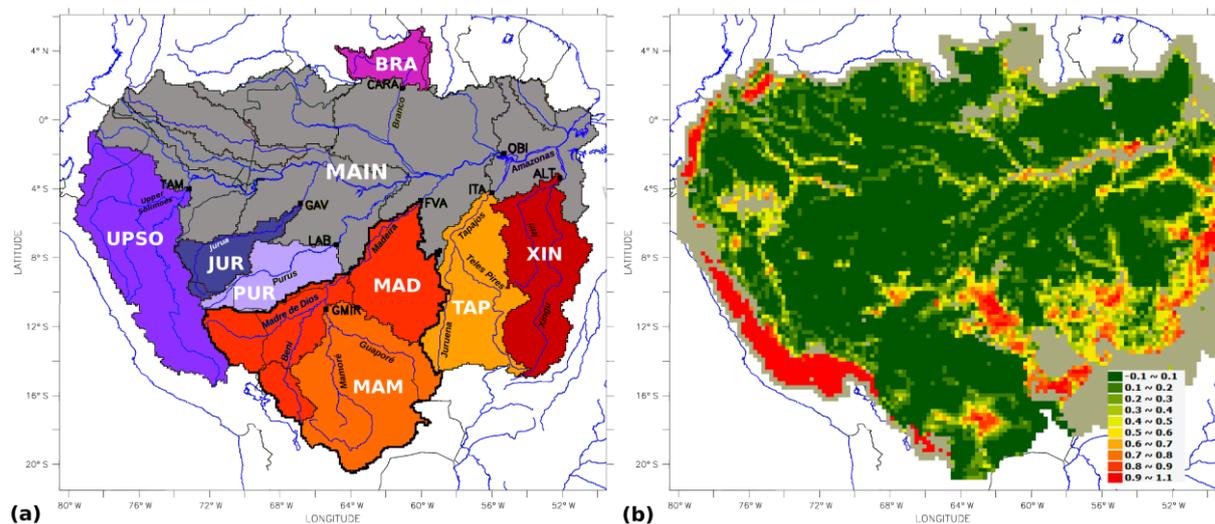


Рисунок 5 – Структура бассейна р. Амазонки (а); процент обезлесивания в ячейках 25×25 км² в 2005 году (б)

Результаты, основанные на годе специальных полевых наблюдений в трех небольших соседних водосборов в восточных Андах, показывают сильную пространственную и временную изменчивость в гидрометеорологических условиях вдоль диапазона высот тропических влажных горных лесов (Tropical Montane Cloud Forests, TМCF) и связаны с количеством покрытия TМCF [19]. Более высокие запасы воды в кронах и почве в более лесистых водосборах по сравнению с менее лесистыми водосборами потенциально уменьшают реакцию дождевого стока во время влажного сезона, когда было обнаружено, что осадки относительно однородны по всей исследуемой территории. Напротив, в течение сухого сезона более высокие участки получают больше воды, чем более низкие. Обнаружены самый высокий средний сток в водосборном бассейне с наибольшим покрытием TМCF, но его более высокая средняя высота не позволила напрямую отнести поток к покрытию TМCF. В целом, не получилось закрыть бюджеты водосбора даже после тщательного рассмотрения всех соответствующих неопределенностей, включая неопределенности в кривых линиях трендов и площадях водосбора, и обнаружили, что сток во всех трех водосборах выше, чем количество осадков. Это предполагает потенциальную важную роль для дополнительных поступлений воды из-за тумана и вклада воды в почву, которые не рассматривались в этой работе. В более широком плане метеорологические

условия в зависимости от высоты на нашем полевом участке были весьма схожи с условиями, обнаруженными в других восточно-андских ТМСФ. Тем не менее, сезонные контрасты предполагают, что эти ТМСФ в бассейне реки Ориноко подвержены динамике влажности восходящих потоков. Таким образом, они могут быть уязвимы к изменениям гидрологии восходящих потоков, связанным с изменением землепользования. Это описание и анализ гидрометеорологических моделей в ТМСФ бассейна реки Ориноко предоставляет новую информацию о гидрологии континентальных ТМСФ с уникальным ветровым растительным покровом, что дает возможность лучше понять обратную связь между низменностями и горными системами, которые поддерживают региональную динамику воды [19].

Таким образом, анализ литературы позволяет сделать следующий вывод. Исследование динамики подстилающей поверхности в бассейнах рек является актуальной задачей, поскольку он позволяет оценить величины стока и других гидрологических параметров, которые определяют объемы воды, ее качество. В анализе используются карты растительности, климатические и гидрологические базы данных, данные дистанционного зондирования за десятилетия наблюдений. В разных странах, для различных климатических условий выявлена неоднозначность влияния обезлесивания или восстановления лесного покрова на гидрологический режим.

2 Исходные данные и используемое программное обеспечение

Использованные в работе данные составляют следующие группы:

- базы климатических и гидрологических данных;
- цифровая модель рельефа для построения речных бассейнов и определения их ландшафтных характеристик MERIT Hydro;
- продукты MODIS: MCD12 (глобальные карты подстилающей поверхности), MCD64 (глобальный продукт о горячих), MOD16 (эвапотранспирация);
- карта растительности России ИКИ РАН;
- данные о динамике лесного покрова по проекту Hansen Global Climate Change [32].

Предварительный и тематический анализ данных проведен с помощью программного обеспечения для решения задач геопространственного анализа (построения речных бассейнов), разработки карт разного содержания, статистического анализа данных.

2.1 Цифровая модель рельефа MERIT Hydro – MERIT Hydrologically Adjusted Elevations

Для построения водосборных территорий (бассейнов) используется цифровая модель рельефа MERIT Hydro – MERIT Hydrologically Adjusted Elevations (версия 1.0 от 17 мая 2019 г.). В ней интегрированы данные рельефа SRTM, AW3D-30 m и Viewfinder Panoramas' DEM; сделаны поправки на растительность (деревья) по снимкам Landsat-8 (сформированные проектом Hansen Global Climate Change [32]), данные разных источников по гидрографии (G3WBM, GSWO, OpenStreetMap, Hydro1K). Набор данных MERIT Hydro – это «гидрологически скорректированный» рельеф [20]. По ЦМР MERIT Hydro можно в автоматическом режиме получать гидрологические векторные карты бассейнов и потоков [21].

Конечный продукт имеет разрешение 3 угловых секунды (90 м на экваторе, около 60 м на широте Красноярска) в глобальном масштабе, в том числе севернее 60 параллели, в отличие от данных SRTM.

Цифровая модель рельефа MERIT DEM распространяется с сайта MERIT Hydro: global hydrography datasets [20]. Для выполнения построения бассейнов используются файлы типа «Adjusted Elevation». Минимальный охват территории – 5×5 градусов. Данные представлены в системе географических координат WGS84 в формате tif.

2.2 Данные SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales (HydroSHEDS)

Гидрологические данные и карты HydroSHEDS, основанные на цифровой модели рельефа SRTM для решения гидрографических задач,

представляют собой несколько наборов разных тематических направлений, отличающихся форматами предоставляемых данных. Это картографические продукты глобального и регионального уровней в согласованном формате в векторных и растровых моделях данных, включая речную сеть, границы бассейнов, направление дренажного стока, и аккумуляция стока.

2.2.1 Данные GloRiC

Данные GloRiC (Global River Classification) содержат информацию о реках в глобальном охвате [22]. Атрибутивная таблица слоя представлена на рисунке 6. Атрибуты – это информация о гидрологических, климатических и геоморфологических параметрах по рекам, классификация которых по этим параметрам составляет 127 классов. Выполнена также статистическая группировка речных участков методом k-средних на 30 кластеров. Набор данных включает в себя 8,5 млн. речных участков общей протяженностью 35,9 млн. км [20].

Table1. Attribute table of GloRiC river reach file. See Ouellet Dallaire et al. (2018) for more details.

Column	Description
Reach_ID	Unique identifier (ID) for every river reach Note: the first digit identifies the region/continent: 1: Africa; 2: Europe; 3: Siberia; 4: Asia; 5: Australia & Oceania; 6: South America; 7: North America; 8: American Arctic; 9: Greenland
Next_down	ID of next downstream river reach Note: the next downstream ID can be used to trace the river network by navigating from reach to reach. Values of 0 indicate reaches with no further downstream connection (pour points).
Length_km	Length of individual river reach [km] Data source: HydroSHEDS (Lehner et al. 2008)
Log_Q_avg	Log-10 of long-term average discharge [m^3/sec] Data sources: WaterGAP (Döll et al. 2003) and HydroSHEDS (Lehner et al. 2008) Long-term average of monthly discharge is available for all reaches of the HydroSHEDS river network at 500 m resolution. WaterGAP data was spatially downscaled from its original 0.5 degree pixel resolution (~50 km at the equator) to the 15 arc-second (~500 m) resolution of the global HydroSHEDS river network (Lehner et al. 2008) using geo-statistical approaches (Lehner & Grill 2013).
Log_Q_var	Log-10 of flow regime variability [-] Data sources: WaterGAP (Döll et al. 2003) and HydroSHEDS (Lehner et al. 2008) Calculated as 'maximum long-term average monthly discharge / long-term average discharge'. See explanations of Log_Q_avg for more details on discharge data.
Class_hydr	Classes of hydrologic sub-classification (15 classes; see provided Excel file for legend)
Temp_min	Long-term average of the minimum air temperature of the coldest month [degrees Celsius] Data source: WorldClim (Hijmans et al. 2005) WorldClim provides data in grid format at 30 arc-second resolution (approx. 1 km x 1 km at equator).
CMI_indx	Climate moisture index [-] Data sources: Global-PET (Trabucco and Zomer 2009) and WorldClim (Hijmans et al. 2005) The CMI was calculated at 30 arc-second resolution as '(precipitation/potential evapotranspiration)-1' using the mean annual potential evapotranspiration from the Global-PET datasets and mean annual precipitation from WorldClim.
Log_elev	Log-10 of average elevation of the reach [meters a.s.l.] Data sources: SRTM (Farr et al. 2007) and HydroSHEDS (Lehner et al. 2008)
Class_phys	Classes of physio-climatic sub-classification (24 classes; see provided Excel file for legend)
Lake_wet	Lake or wetland influence [binary: 0 = no; 1 = yes] Data sources: Global Lakes and Wetlands Database GLWD (Lehner and Döll 2004) Lake-wetland influence was calculated as a binary index where reaches that were located partly or totally inside a wetland zone from GLWD would get a value of one. We used all of the classes from GLWD as wetland indicators, which include large lakes.
Stream_pow	Total stream power [kW/m^2] Data sources: HydroSHEDS (Lehner et al. 2008), WaterGAP (Döll et al. 2003) and SRTM (Farr et al. 2007) Total stream power was calculated as 'water density [kg/m^3] x gravitational acceleration [m/s^2] x discharge [m^3/s] x stream gradient [m/m]', with stream gradient calculated as the maximum minus the average elevation of the reach, divided by the length of the reach.
Class_geom	Classes of geomorphic sub-classification (127 classes; see provided Excel file for legend)
Reach_type	Combined river reach type (4 classes; see provided Excel file for legend)
Kmeans_30	Classes of k-means statistical clustering (30 classes; no associated names)

Рисунок 6 – Атрибутивная таблица данных GloRiC

В полях Class_hydr, Class_phys, Class_indx, Class_geom содержатся коды кластеров, в которые попадает каждый участок реки. Бассейны 1 уровня – это вся территория Сибири.

На рисунках 7 – 8 показаны примеры векторных данных в разных пространственных масштабах.

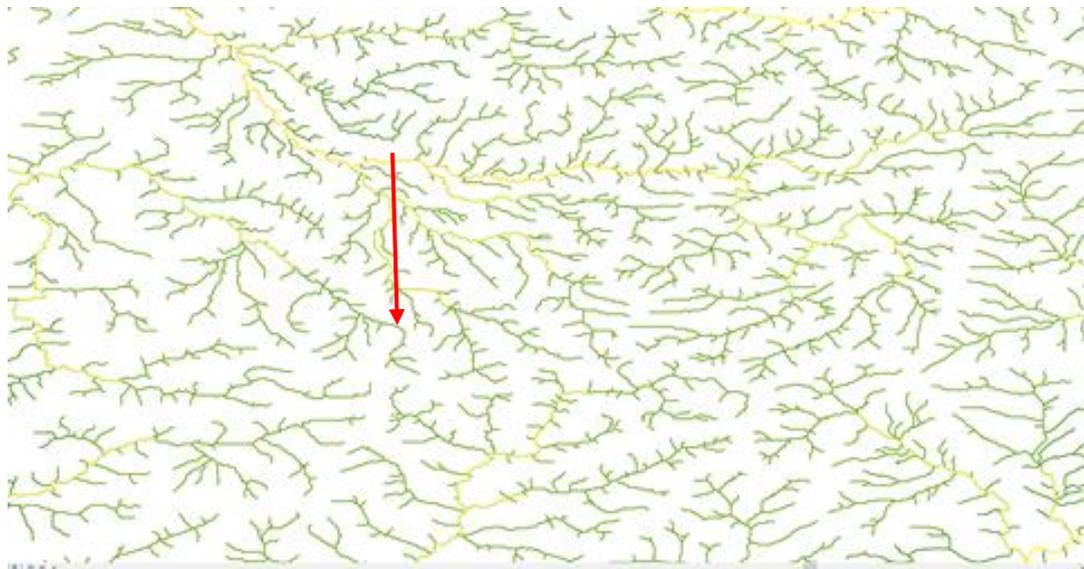


Рисунок 7 – Слой рек, цветовая дифференциация по параметру «Гидрологический класс», в центре р. Кебеж, Западный Саян

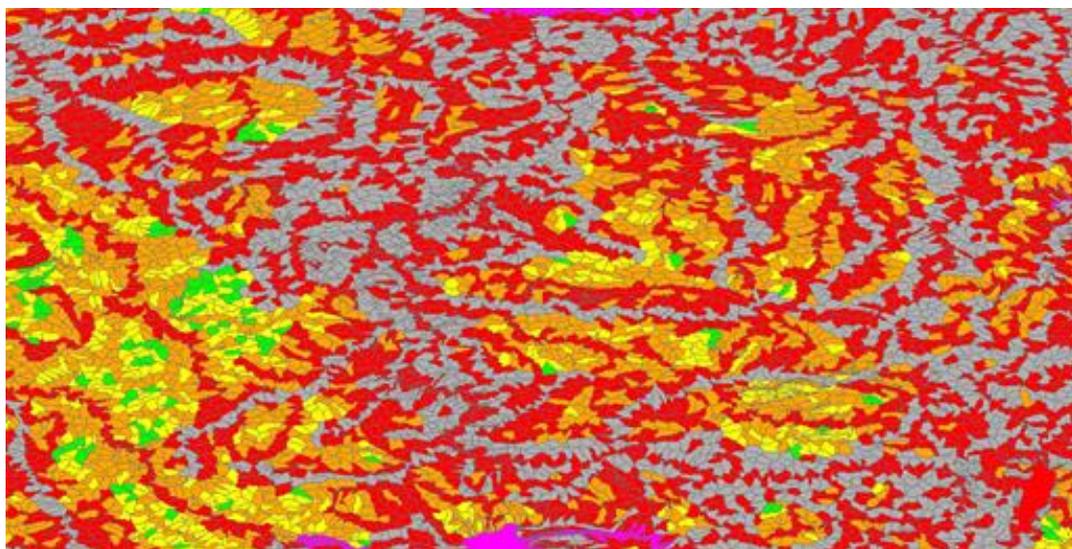


Рисунок 8 – Бассейны двенадцатого уровня

Первый уровень представлен самыми большими по площади бассейнами крупных рек. Более дробное деление бассейнов осуществляется для притоков первого, второго и т.д. порядков. На некоторые территории деление до 12 уровня бассейнов не выполнено (например, на часть Западного Саяна).

2.2.2 Данные HydroATLAS

Компонент HydroATLAS данных HydroSHEDS содержит глобальную гидро-экологическую информацию о реках и водосборных бассейнах с пространственным разрешением 15 секунд, собранную из нескольких глобальных банков данных. Набор HydroATLAS состоит из двух баз данных: BasinATLAS (полигоны) и RiverATLAS (линии).

База данных HydroATLAS предлагает атрибуты, сгруппированные в семь категорий: гидрология; физиография; климат; land use/ land cover; почвы и геология; антропогенные воздействия. В своей первой версии HydroATLAS содержит 56 гидроэкологических переменных, разделенных на 281 отдельный атрибут [23]. На рисунке 9 приведен список полей атрибутивной таблицы. Для каждого пункта существует расшифровка значений, и каждый пункт содержит 3–4 поля с более детальной информацией.

В наборе включены такие атрибуты, необходимые для исследования, как лесное покрытие, поверхностный сток, температуры (среднегодовая, минимальная и максимальная, среднемесячная); количество осадков среднегодовое и среднемесячное из базы данных WorldClim v1.4 [24].

Другие атрибуты представляют разноплановую информацию, включая количество населения, классы по свежей воде и пр.

Лесистость по данным BasinATLAS представлена как характеристика каждого бассейна каждого из двенадцати уровней – атрибуты типа Forest Cover Extent: for_pc_sse и for_pc_use - процент площади, занятой лесами (первые восемь классов растительности в классификации GLC2000) в бассейне или водосборной площади соответственно.

Данные по климату в атрибутивных таблицах объектов включают:

- потенциальную эвапотранспирацию Potential Evapotranspiration (Global-PET, pet_mm);
- реальную эвапотранспирацию Actual Evapotranspiration (Global Soil-Water Balance, aet_mm_);
- глобальный индекс засушливости Global Aridity Index (Global Aridity Index, ari_ix_);
- климатический индекс влажности Climate Moisture Index (WorldClim & Global-PET, cmi_ix_);
- доля покрытия снежным покровом Climate Snow Cover Extent (MODIS/Aqua, snw_pc_).

Другие атрибуты представляют разноплановую информацию, включая количество населения, классы по качеству воды и пр.

BasinATLAS Attributes (version 1.0)

(click hyperlinked ID to jump to individual information sheet)

ID	Category	Attribute	Source Data	Citation	Column(s)	Count
H01	Hydrology	Natural Discharge	WaterGAP v2.2	Döll et al. 2003	dis_m3_---	x3
H02	Hydrology	Land Surface Runoff	WaterGAP v2.2	Döll et al. 2003	run_mm_---	x1
H03	Hydrology	Inundation Extent	GIEMS-D15	Fluet-Chouinard et al. 2015	inu_pc_---	x6
H04	Hydrology	Limnicity (Percent Lake Area)	HydroLAKES	Messenger et al. 2016	lka_pc_---	x2
H05	Hydrology	Lake Volume	HydroLAKES	Messenger et al. 2016	lkv_mc_---	x1
H06	Hydrology	Reservoir Volume	GRanD v1.1	Lehner et al. 2011	rev_mc_---	x1
H07	Hydrology	Degree of Regulation	HydroSHEDS & GRanD	Lehner et al. 2011	dor_pc_---	x1
H08	Hydrology	River Area	HydroSHEDS & WaterGAP	Lehner & Grill 2013	ria_ha_---	x2
H09	Hydrology	River Volume	HydroSHEDS & WaterGAP	Lehner & Grill 2013	riv_tc_---	x2
H10	Hydrology	Groundwater Table Depth	Global Groundwater Map	Fan et al. 2013	gwt_cm_---	x1
P01	Physiography	Elevation	EarthEnv-DEM90	Robinson et al. 2014	ele_mt_---	x4
P02	Physiography	Terrain Slope	EarthEnv-DEM90	Robinson et al. 2014	slp_dg_---	x2
P03	Physiography	Stream Gradient	EarthEnv-DEM90	Robinson et al. 2014	sgr_dk_---	x1
C01	Climate	Climate Zones	GEN5	Metzger et al. 2013	clz_cl_---	x1
C02	Climate	Climate Strata	GEN5	Metzger et al. 2013	cls_cl_---	x1
C03	Climate	Air Temperature	WorldClim v1.4	Hijmans et al. 2005	tmp_dc_---	x16
C04	Climate	Precipitation	WorldClim v1.4	Hijmans et al. 2005	pre_mm_---	x14
C05	Climate	Potential Evapotranspiration	Global-PET	Zomer et al. 2008	pet_mm_---	x14
C06	Climate	Actual Evapotranspiration	Global Soil-Water Balance	Trabucco & Zomer 2010	aet_mm_---	x14
C07	Climate	Global Aridity Index	Global Aridity Index	Zomer et al. 2008	ari_ix_---	x2
C08	Climate	Climate Moisture Index	WorldClim & Global-PET	Hijmans et al. 2005	cmi_ix_---	x14
C09	Climate	Snow Cover Extent	MODIS/Aqua	Hall & Riggs 2016	snw_pc_---	x15
L01	Landcover	Land Cover Classes	GLC2000	Bartholomé & Belward 2005	glc_cl_---	x1
L02	Landcover	Land Cover Extent	GLC2000	Bartholomé & Belward 2005	glc_pc_---	x44
L03	Landcover	Potential Natural Vegetation Classes	EarthStat	Ramankutty & Foley 1999	prv_cl_---	x1
L04	Landcover	Potential Natural Vegetation Extent	EarthStat	Ramankutty & Foley 1999	prv_pc_---	x30
L05	Landcover	Wetland Classes	GLWD	Lehner & Döll 2004	wet_cl_---	x1
L06	Landcover	Wetland Extent	GLWD	Lehner & Döll 2004	wet_pc_---	x22
L07	Landcover	Forest Cover Extent	GLC2000	Bartholomé & Belward 2005	for_pc_---	x2
L08	Landcover	Cropland Extent	EarthStat	Ramankutty et al. 2008	crp_pc_---	x2
L09	Landcover	Pasture Extent	EarthStat	Ramankutty et al. 2008	pst_pc_---	x2
L10	Landcover	Irrigated Area Extent (Equipped)	HID v1.0	Siebert et al. 2015	ire_pc_---	x2
L11	Landcover	Glacier Extent	GLIMS	GLIMS & NSIDC 2012	gla_pc_---	x2
L12	Landcover	Permafrost Extent	PZI	Gruber 2012	prm_pc_---	x2
L13	Landcover	Protected Area Extent	WDPA	IUCN & UNEP-WCMC 2014	pac_pc_---	x2
L14	Landcover	Terrestrial Biomes	TEOW	Dinerstein et al. 2017	tbi_cl_---	x1
L15	Landcover	Terrestrial Ecoregions	TEOW	Dinerstein et al. 2017	tec_cl_---	x1
L16	Landcover	Freshwater Major Habitat Types	FEOW	Abell et al. 2008	fwh_cl_---	x1
L17	Landcover	Freshwater Ecoregions	FEOW	Abell et al. 2008	fec_cl_---	x1
S01	Soils & Geology	Clay Fraction in Soil	SoilGrids1km	Hengl et al. 2014	cl_yc_---	x2
S02	Soils & Geology	Silt Fraction in Soil	SoilGrids1km	Hengl et al. 2014	slt_pc_---	x2
S03	Soils & Geology	Sand Fraction in Soil	SoilGrids1km	Hengl et al. 2014	snd_pc_---	x2
S04	Soils & Geology	Organic Carbon Content in Soil	SoilGrids1km	Hengl et al. 2014	soc_th_---	x2
S05	Soils & Geology	Soil Water Content	Global Soil-Water Balance	Trabucco & Zomer 2010	swc_pc_---	x14
S06	Soils & Geology	Lithological Classes	GLIM	Hartmann & Moosdorf 2012	lit_cl_---	x1
S07	Soils & Geology	Karst Area Extent	Rock Outcrops v3.0	Williams & Ford 2006	kar_pc_---	x2
S08	Soils & Geology	Soil Erosion	GloSEM v1.2	Borrelli et al. 2017	ero_kh_---	x2
A01	Anthropogenic	Population Count	GPW v4	CIESIN 2016	pop_ct_---	x2
A02	Anthropogenic	Population Density	GPW v4	CIESIN 2016	ppd_pk_---	x2
A03	Anthropogenic	Urban Extent	GHS 5-MOD v1.0 (2016)	Pesaresi & Freire 2016	urb_pc_---	x2
A04	Anthropogenic	Nighttime Lights	Nighttime Lights v4	Doll 2008	ntl_ix_---	x2
A05	Anthropogenic	Road Density	GRIP v4	Meijer et al. 2018	rdd_mk_---	x2
A06	Anthropogenic	Human Footprint	Human Footprint v2	Venter et al. 2016	hft_ix_---	x4
A07	Anthropogenic	Global Administrative Areas	GADM v2.0	University of Berkeley 2012	gad_id_---	x1
A08	Anthropogenic	Gross Domestic Product	GDP PPP v2	Kummu et al. 2018	gdp_ud_---	x3
A09	Anthropogenic	Human Development Index	HDI v2	Kummu et al. 2018	hdi_ix_---	x1
Total		Variables: 56			Attributes: 281	

Рисунок 10 – Список атрибутов полигонального слоя водосборных бассейнов

Столбец Count показывает, сколько полей представляют более детальную информацию по каждому параметру.

2.3 Карты растительного покрова

Для анализа растительности бассейнов использованы цифровые карты растительного покрова России и глобальные карты растительности.

Карта растительного покрова РФ построена специализированными методами классификации в Институте космических исследований РАН [25, 26]. Карта представлена в растровом формате, пространственное разрешение

230 м, содержит 31 класс типов поверхности. На рисунке 11 приведен фрагмент карты растительности на территории трех речных бассейнов центральной части Красноярского края – Качи, Малого Кемчуга и Бузима.

Использовался также продукт MCD12 из продуктов MODIS [27] – глобальная карта растительного покрова по классификации Международной геосферно-биосферной программы IGBP, которая ежегодно создается как по космическим снимкам MODIS за год.

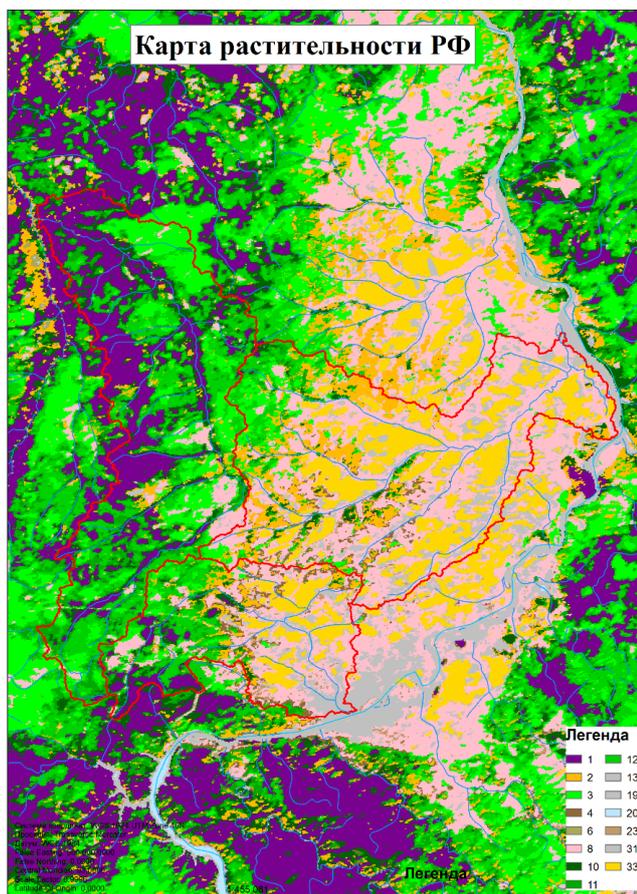


Рисунок 11 – Фрагмент карты растительности России

Элементы легенды.

1 Вечнозеленые темнохвойные леса (еловые, пихтовые, кедровые) с проективным покрытием не менее 80% в составе;

2 Вечнозеленые светлохвойные леса (сосновые) с проективным покрытием не менее 80%;

3 Лиственные леса (березовые, осиновые) и другие лиственные породы с проективным покрытием не менее 80%;

10 Смешанные хвойно-лиственные леса с 60%-80% проективного покрытия хвойных и 20% – 40% лиственных пород;

11 Смешанные леса с примерно одинаковым присутствием хвойных и лиственных пород – от 40% до 60%;

- 12 Смешанные лиственный-хвойные леса с 60%-80% проективного покрытия лиственных и 20% – 40% хвойных пород;
- 4 Лиственный леса с проективным покрытием не менее 80% в составе;
- 23 Лиственный редколесья;
- 8 Влажные травяные сообщества с присутствием леса или кустарников не более 20% проективного покрытия;
- 6, 7, 21, 22 Болота;
- 33 Сельскохозяйственные угодья;
- 32 Снег и лед;
- 13, 19 Открытые почвы и каменистые поверхности;
- 20 Водные поверхности;
- 31 Застройки (населенные пункты, дороги)

На рисунке 12 представлена карта растительности по классификации Международной геосферно-биосферной программы (IGBP) в пределах той же территории, что и на рисунке 11. Карта получена из первого слоя продукта MODIS MCD12, 2019 год.

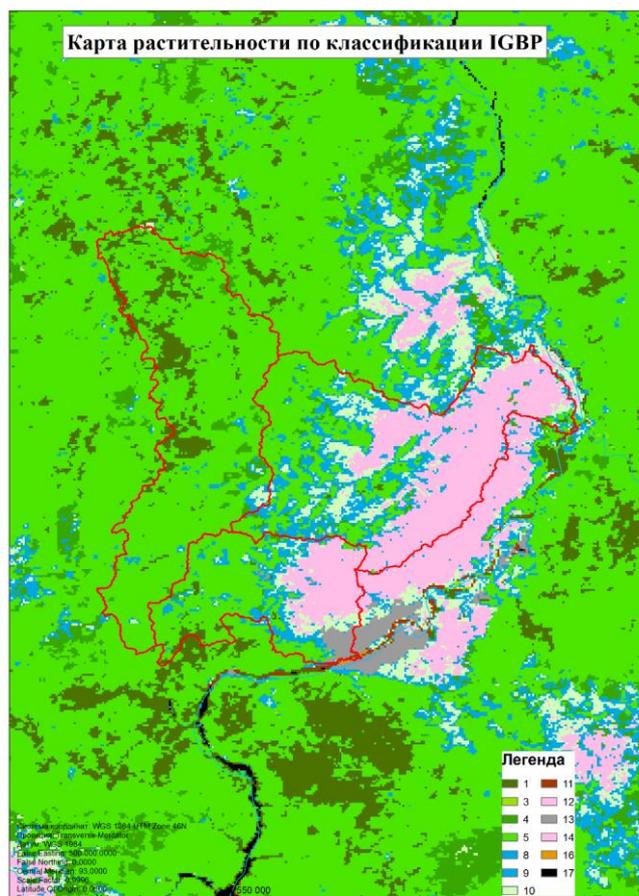


Рисунок 12 – Карта растительности по классификации IGBP, 2019 год

Легенда карты приведена в первом столбце таблицы на рисунке 13.

*Land Cover Types Description (1 through 4 classification schemes)				
Class	IGBP (Type 1)	UMD (Type 2)	LAI/FPAR (Type 3)	NPP (Type 4)
0	Water	Water	Water	Water
1	Evergreen Needleleaf forest	Evergreen Needleleaf forest	Grasses/Cereal crops	Evergreen Needleleaf vegetation
2	Evergreen Broadleaf forest	Evergreen Broadleaf forest	Shrubs	Evergreen Broadleaf vegetation
3	Deciduous Needleleaf forest	Deciduous Needleleaf forest	Broadleaf crops	Deciduous Needleleaf vegetation
4	Deciduous Broadleaf forest	Deciduous Broadleaf forest	Savanna	Deciduous Broadleaf vegetation
5	Mixed forest	Mixed forest	Evergreen Broadleaf forest	Annual Broadleaf vegetation
6	Closed shrublands	Closed shrublands	Deciduous Broadleaf forest	Annual grass vegetation
7	Open shrublands	Open shrublands	Evergreen Needleleaf forest	Non-vegetated land
8	Woody savannas	Woody savannas	Deciduous Needleleaf forest	Urban
9	Savannas	Savannas	Non-vegetated	
10	Grasslands	Grasslands	Urban	
11	Permanent wetlands			
12	Croplands	Croplands		
13	Urban and built-up	Urban and built-up		
14	Cropland/Natural vegetation mosaic			
15	Snow and ice			
16	Barren or sparsely vegetated	Barren or sparsely vegetated		
254	Unclassified	Unclassified	Unclassified	Unclassified
255	Fill Value	Fill Value	Fill Value	Fill Value

Рисунок 13 – Легенда карт подстилающей поверхности в продукте MCD12

В этом случае классы являются более генерализованными, чем на карте растительности России.

2.4 Данные по эвапотранспирации в продукте MOD16

Данные об эвапотранспирации в наборе HydroSheds являются атрибутами бассейна и пространственно дифференцируются и уточняются при переходе к бассейнам более высокого уровня вложенности.

Более детальные в пространственном смысле данные об эвапотранспирации содержатся в продукте MOD16. Данные формируются с временным интервалом 8 дней, содержат месячные или годовые значения: сумма эвапотранспирации за соответствующий временной период.

Продукт MOD16 MOD16A2GF.006 Эвапотранспирация распространяется отдельными сценами с разрешением 500 м в формате HDF-EOS. Данные содержат пять слоев данных средних или суммарных значений за восемь последовательных дней:

- потенциальная эвапотранспирация;
- реальная эвапотранспирация;
- потенциальный поток тепла;
- реальный поток тепла;
- слой качества данных.

Данные доступны сценами размером 2400×2400 пикселей в синусоидальной проекции. В работе использовался только слой реальной эвапотранспирации.

2.5 Данные о гаях в продукте MOD16

Объединенный продукт данных Terra и Aqua MCD64A1 Version 6 Burned Area - это ежемесячный продукт с глобальной сеткой с пространственным разрешением 500 метров, содержащий попиксельные данные о территории гарей и информацию о качестве и надежности данных. В продукте MCD64A1 для картирования выгоревших площадей используются снимки MODIS с пространственным разрешением 500 м и данные об активном горении с разрешением 1 км. Алгоритм использует специальный вегетационный индекс для создания динамических пороговых значений, которые применяются к составным данным на основе данных пятого и седьмого каналов MODIS после атмосферной коррекции. Алгоритм определяет дату горения для 500-метровых ячеек сетки в каждом отдельном тайле MODIS.

Уровни данных, представленные в продукте MCD64A1, включают слой с датой появления гари, неопределенность оценки, уровень качества; собственно данные – это номер дня, в который появилась гарь.

Данные MCD64 использовались только в облачной среде EarthEngine.

2.6 Данные о климате ERA5

В работе использовались данные о климате, доступные на сервере Google Earth Engine [5]. На первом этапе был проведен просмотр доступных данных для выбора интересующих наборов данных.

2.6.1 База данных ERA5-Land monthly averaged - ECMWF climate reanalysis

Данные охватывают временной интервал с января 1981 г. по декабрь 2020 г. Пространственное разрешение 0,1 градуса.

ERA5-Land – это набор данных реанализа, обеспечивающий согласованное представление о динамике переменных по территории суши с улучшенным разрешением по сравнению с ERA5. ERA5-Land был создан путем воспроизведения наземного компонента реанализа климата ERA5 ECMWF. Реанализ объединяет данные модели с наблюдениями со всего мира в глобально полный и согласованный набор данных с использованием законов

физики. Реанализ дает данные, которые уходят на несколько десятилетий назад и дают точное описание климата прошлого. Этот набор данных включает все 50 переменных, доступных на CDS.

Данные являются подмножеством полного набора данных ERA5-Land, подвергнутого последующей обработке ECMWF. Среднемесячные значения были предварительно рассчитаны, чтобы упростить работу многих приложений, требующих простого и быстрого доступа к данным, когда поля с данными чаще, чем месяц, не требуются.

Слои данных перечислены в таблице в Приложении А.

2.6.2 Набор данных GLDAS-2.1: Global Land Data Assimilation System

Временной интервал с января 2000 г. по декабрь 2020 г.

Провайдер данных – NASA GES DISC (Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center) при NASA Goddard Space Flight Center. Разрешение 0.25 градуса.

Глобальная система ассимиляции наземных данных (GLDAS, Global Land Data Assimilation System) принимает продукты спутниковых и наземных наблюдений. Используя передовые методы моделирования земной поверхности и ассимиляции данных, генерируются оптимальные поля состояний земной поверхности и потоков.

GLDAS-2.1 является одним из двух компонентов набора данных GLDAS версии 2 (GLDAS-2), аналогичен потоку продуктов GLDAS-1, с модернизированными моделями, вызванными комбинацией наборов данных GDAS, дезагрегированных GPCP и AGRMET.

Моделирование GLDAS-2.1 началось 1 января 2000 г. с использованием условий моделирования GLDAS-2.0. Это моделирование было инициировано Национальным управлением по исследованию океанов и атмосферы (NOAA) Глобальной системы усвоения данных (GDAS), затрагивает дезагрегированные и агрегированные поля осадков Глобального проекта климатологии осадков (GPCP), а также радиационных полей системы AGRicultural METeorological Modeling (AGRMET) Агентства погоды BBC США, которая стала доступной с 1 марта 2001 года.

Слои данных перечислены в таблице 1.

2.6.3 База данных ERA5 Monthly aggregates - Latest climate reanalysis produced by ECMWF / Copernicus Climate Change Service

Временной охват с января 1979 г. по июнь 2020 г.

Провайдер данных ECMWF / Copernicus Climate Change Service. Разрешение 0.25 градуса.

ERA5 предоставляет агрегированные значения за каждый месяц для семи параметров реанализа климата ERA5: температура воздуха на высоте 2

Таблица 1 – Описание слоев данных набора GLDAS-2.1

Имя	Единица измерения	Минимум	Максимум	Описание
Albedo_inst	%	4.99*	82.25*	Albedo
AvgSurfT_inst	К	187.48*	1323.35*	Average surface skin temperature
CanopInt_inst	kg/m ²	0*	0.5*	Plant canopy surface water
ECanop_tavg	W/m ²	0*	1273.66*	Canopy water evaporation
ESoil_tavg	W/m ²	0*	2275.63*	Direct evaporation from bare soil
Evap_tavg	kg/m ² /s	0*	0.002*	Evapotranspiration
LWdown_f_tavg	W/m ²	26.85*	600.9*	Downward long-wave radiation flux
Lwnet_tavg	W/m ²	-13792.7*	196.97*	Net long-wave radiation flux
PotEvap_tavg	W/m ²	-227.75*	18977.9*	Potential evaporation rate
Psurf_f_inst	Pa	44063.1*	108344*	Pressure
Qair_f_inst	kg/kg	-0.02*	0.07*	Specific humidity
Qg_tavg	W/m ²	-552.64*	1538.41*	Heat flux
Qh_tavg	W/m ²	-1005.15*	18190.6*	Sensible heat net flux
Qle_tavg	W/m ²	-227.75*	5072.25*	Latent heat net flux
Qs_acc	kg/m ²	0*	170.93*	Storm surface runoff
Qsb_acc	kg/m ²	0*	50.6*	Baseflow-groundwater runoff
Qsm_acc	kg/m ²	0*	42.87*	Snow melt
Rainf_f_tavg	kg/m ² /s	0*	0.01*	Total precipitation rate
Rainf_tavg	kg/m ² /s	0*	0.01*	Rain precipitation rate
RootMoist_inst	kg/m ²	2*	949.6*	Root zone soil moisture
SWE_inst	kg/m ²	0*	120787*	Snow depth water equivalent
SWdown_f_tavg	W/m ²	-56.93*	30462.8*	Downward short-wave radiation flux
SnowDepth_inst	m	0*	301.96*	Snow depth
Snowf_tavg	kg/m ² /s	0*	0.009*	Snow precipitation rate
SoilMoi0_10cm_inst	kg/m ²	1.99*	47.59*	Soil moisture
SoilMoi10_40cm_inst	kg/m ²	5.99*	142.8*	Soil moisture
SoilMoi40_100cm_inst	kg/m ²	11.99*	285.6*	Soil moisture
SoilMoi100_200cm_inst	kg/m ²	20*	476*	Soil moisture
SoilTMP0_10cm_inst	К	221.98*	377.5*	Soil temperature
SoilTMP10_40cm_inst	К	227.43*	319.44*	Soil temperature
SoilTMP40_100cm_inst	К	232.97*	316.2*	Soil temperature
SoilTMP100_200cm_inst	К	238.52*	314.11*	Soil temperature
Swnet_tavg	W/m ²	-48.96*	23741.3*	Net short wave radiation flux
Tair_f_inst	К	206.8*	327.66*	Air temperature
Tveg_tavg	W/m ²	0*	3455.14*	Transpiration
Wind_f_inst	m/s	0*	57.7*	Wind speed
* estimated min or max value				

метра, температура точки росы на высоте 2 метра, общее количество осадков, среднее давление на уровне моря, приземное давление, u-составляющая ветра и v-составляющая ветра на высоте 10-метров. Ежемесячные минимальная и максимальная температура воздуха на высоте 2 м были рассчитаны на основе данных о температуре воздуха на высоте 2 м за час. Сумма месячных осадков – сумма за месяц, остальные параметры представлены как среднемесячные.

Данные ERA5 доступны с 1979 года до трех месяцев от текущего времени в режиме реального времени. Дополнительную информацию и другие параметры атмосферы ERA5 можно найти в хранилище климатических данных Copernicus.

Слои данных перечислены в таблице 2.

Примеры использования данных из базы климатических данных реанализа ERA5 приведены в [28–31]. Отмечается важность этих данных как для глобальных, так и региональных исследований. Особенно важно использование данных для областей, где наземных данных недостаточно для исследований, требующих долговременных рядов климатических и гидрологических наблюдений. Данные используются для решения важных мониторинговых и прогнозных задач.

2.6.4 Данные о динамике лесного покрова

Набор данных о динамике лесного покрова [32] состоит из тайлов размером 10×10 градусов. Пространственное разрешение 1 секунда дуги, примерно 30 м на экваторе. В каждом тайле содержится семь файлов с беззнаковыми 8-битными данными:

- проективное покрытие древесного покрова на 2000 год представлены в файле `treecover2000` в виде процента проективного покрытия. Деревьями считаются растения высотой выше 5 м;

- `Global forest cover gain 2000–2012 (gain)`, появление лесного покрова, изменение типа покрова с нелесного на лесной, значения кодируются 1 (`gain`) или 0 (`no gain`);

- `Year of gross forest cover loss event (lossyear)`, исчезновение лесного покрова в период с 2000 по 2018 год, значения пикселей – это либо 0 в случае отсутствия изменения лесного покрова, либо значения 1–17, соответствующие году перехода типа поверхности от лесного к нелесному;

- параметры качества данных, маски водных поверхностей и пр.

Таблица 2 – Описание слоев данных набора ERA5

Имя	Единица измерения	Минимум	Максимум	Описание
mean_2m_air_temperature	К	224	304	Average air temperature at 2m height (monthly average)
minimum_2m_air_temperature	К	213.1	298.9	Minimum air temperature at 2m height (monthly minimum)
maximum_2m_air_temperature	К	233.8	314.3	Maximum air temperature at 2m height (monthly maximum)
dewpoint_2m_temperature	К	219.8	297.6	Dewpoint temperature at 2m height (monthly average)
total_precipitation	м	0	0.4	Total precipitation (monthly sums)
surface_pressure	Pa	65256.9	102427	Surface pressure (monthly average)
mean_sea_level_pressure	Pa	98206.4	102943	Mean sea level pressure (monthly average)
u_component_of_wind_10m	м с-1	-8.7	8.7	10m u-component of wind (monthly average)
v_component_of_wind_10m	м с-1	-6.8	6.8	10m v-component of wind (monthly average)

Данные более ориентированы на решение задачи прогнозирования погоды.

2.7 Используемое программное обеспечение

2.7.1 Программный продукт ArcGIS

ArcGIS – это полный набор инструментов и возможностей для картографии и анализа местоположения. ArcGIS можно развернуть на локальных компьютерах (ArcGIS Pro), на удаленных или локальных серверах (ArcGIS Enterprise) или как облачную среду как услуга (SaaS), размещенный на Esri (ArcGIS Online) [33]. ArcGIS включает специализированные приложения для предоставления комплексных решений разных задач. ArcGIS также предоставляет богатые инструменты разработки программного обеспечения для настройки и создания собственных картографических продуктов и пространственного анализа. ArcGIS состоит из четырех основных программных частей:

- модели географической информации для моделирования аспектов реального мира;
- компоненты для хранения и управления географической информацией в файлах и базах данных;
- набор готовых приложений для создания, редактирования, управления, картографирования, анализа и распространения географической информации;
- набор веб-сервисов, которые предоставляют контент и возможности (данные и функции) сетевым программным клиентам.

Части системы программного обеспечения ArcGIS можно развернуть на мобильных устройствах, портативных и настольных компьютерах и серверах. В данной работе ArcGIS в настольном варианте применялась для построения тематических карт.

2.7.2 Программный продукт QGIS

Свободная ГИС с открытым кодом QGIS развивается с 2002 года сообществом специалистов по пространственному анализу данных. Программная среда позволяет просматривать и накладывать друг на друга векторные и растровые данные в различных форматах и проекциях без преобразования во внутренний или общий формат [34]. Поддерживаются следующие основные форматы:

- пространственные таблицы PostgreSQL с использованием PostGIS, векторные форматы, поддерживаемые установленной библиотекой OGR, включая shape-файлы ESRI, MapInfo, SDTS (Spatial Data Transfer Standard) и GML (Geography Markup Language) и др.;

- форматы растров и графики, поддерживаемые библиотекой GDAL (Geospatial Data Abstraction Library), такие, как GeoTIFF, Erdas IMG, ArcInfo ASCII Grid, JPEG, PNG и др.;

- базы данных SpatiaLite;

- растровый и векторный форматы GRASS (область/набор данных).

В данной работе QGIS применялась для конвертации данных, построения бассейнов рек, мозаик растровых данных, маскирования данных, построения карт (с модулями GRASS).

2.7.3 Программа Whitebox GAT

Для автоматического построения компонентов гидрологической карты использовалось программное обеспечение Whitebox GAT [35]. ПО Whitebox GAT – это открытое программное обеспечение для продвинутого геопространственного анализа данных. Платформа разработана для апробации и развития новых методов пространственного анализа, для использования в среде обучения в области геоматики. Реализованные в Whitebox GAT алгоритмы формирования бассейнов и водосборных территорий отличаются от тех, что реализованы в профессиональном ПО ArcGIS, поскольку реализованы полностью в автоматическом режиме.

2.7.4 Облачная среда Google EarthEngine

Облачная платформа Google Earth Engine [5] – это платформа для геопространственного анализа данных глобального масштаба, которая использует огромные вычислительные возможности Google для решения социальных проблем, включая вырубку лесов, засуху, стихийные бедствия,

болезни, продовольственную безопасность, управление водными ресурсами, мониторинг климата, защита окружающей среды. Она уникальна как интегрированная платформа, предназначенная для расширения возможностей не только специалистов, занимающихся дистанционным зондированием, но и гораздо более широкой аудитории, которой не хватает технических возможностей, необходимых для использования традиционных суперкомпьютеров или крупномасштабных ресурсов облачных вычислений [6]. Earth Engine – вычислительная среда, геопространственный прикладной программный интерфейс (JavaScript, Python, REST) и интерактивный прикладной сервер, работающие с открытым каталогом данных (несколько петабайтов данных).

Каталог данных Earth Engine содержит большое хранилище общедоступных наборов геопространственных данных, включая данные с различных спутниковых и аэрофотосъемочных систем в оптическом и микроволновом диапазоне длин волн, переменные окружающей среды, прогнозы погоды и климата и ретроспективные прогнозы, растительный покров, топографические и социально-экономические данные. Данные предварительно преобразуются в готовый к использованию формат, обеспечивающий эффективный доступ и управление ими.

Пользователи могут получать доступ и анализировать данные из общедоступного каталога, а также свои личные данные, используя библиотеку операторов, предоставляемую API Earth Engine. Эти операторы реализованы в большой системе параллельной обработки, которая автоматически разделяет и распределяет вычисления, обеспечивая возможности анализа с высокой пропускной способностью. Пользователи получают доступ к API через библиотеку тонких клиентов или через интерактивную веб-среду разработки, построенную на основе этой клиентской библиотеки [6].

Большой интерес для гидро-климатических исследований представляют базы данных метео и гидрологических данных, объединяющие материалы наблюдений на метеостанциях и результаты реанализа. Климатические модели генерируют как долгосрочные прогнозы климата, так и исторические интерполяции приземных переменных. Каталог Earth Engine включает исторические данные реанализа из NCEP/NCAR, наборы метеорологических данных с координатной привязкой, такие как NLDAS-2 и GridMET, и выходные данные климатических моделей, такие как MACAv2-METDATA Университета Айдахо и уменьшенные климатические прогнозы NASA Earth Exchange.

3 Создание тематических карт многолетних средних климатических и гидрологических характеристик бассейнов рек Красноярского края

Первый этап исследования гидрологического режима речных бассейнов состоял в разработке тематических карт их климатических и гидрологических характеристик в целом по бассейну по средним многолетним значениям для общего представления о пространственном распределении климато-гидрологических параметров в Красноярском крае. Использовались следующие данные:

- гидрографическая БД HydroATLAS;
- цифровая модель рельефа MERIT Hydro для построения бассейнов рек;
- карта растительности РФ [25, 26];
- данные о динамике лесного покрова [32].

Составлены карты компонентов водного баланса по бассейнам (поверхностный сток, эвопотранспирация), карты климатических параметров (средние температуры, количество осадков), карты растительности бассейнов, как одного из основных факторов, определяющих водный баланс территорий.

3.1 Тематическое содержание карт

В Приложении Б показаны тематические карты растительного покрова, лесистости и гидрологических характеристик речных бассейнов Красноярского края.

Карта растительного покрова показывает тип растительности в пределах каждого бассейна на территории Красноярского края, включая породный состав лесов. Карта лесистости представляет значение лесистости для каждого бассейна и показывает процент площади, занятой лесами. Обе карты имеют картографическую проекцию UTM зона 46 на сфероиде WGS84. Масштаб карт 1 : 11 250 000.

Уровень масштаба бассейнов HydroAtlas выбран равным пяти для соответствия с масштабом векторных слоев OSM.

Легенда карты показывает список классов растительного покрова, которые отображаются в пределах территории. Отдельно вставлены описания классов, как это сделано на исходной карте [25].

Лесистость бассейнов представлена классификацией значений на десять уровней с шагом 10% показателя. Гидрографические объекты представлены озерами карты OSM и реками из БД GloRiC_v10. Реки отобраны для отображения по полю Class_hydr со значениями классов 21, 22, 23; 31, 32, 33; 41, 42, 43; 51, 52, 53 и сгруппированы в четыре класса уровней 2, 3, 4 и 5. Этот уровень детализации соответствует уровню детализации границ бассейнов.

На следующей карте показаны характеристики водного режима бассейнов: годовые многолетние средние значения стока, объема руслового стока, глубины залегания грунтовых вод, содержания влаги в почве и доля вечномерзлотных грунтов в пределах каждого бассейна. Эти параметры в

целом определяют характер формирования стока, его сезонную изменчивость и пр. для каждого бассейна. Визуальное сопоставление параметров формирования гидрологического режима внутри бассейнов дает возможность оценить вклад каждой особенности бассейна в формирование стока. Картограммы дают возможность сделать вывод о наличии как широтных (в соответствии с климатическими зонами), так и долготных различий на территории края. Пять карт имеют картографическую проекцию UTM зона 46 на сфероиде WGS84. На каждой карте характеристика показана с делением на 10 классов методом естественных границ. Масштаб каждой карты 1 : 18 000 000.

На карте климатических характеристик (Приложение Б) представлены среднемесячные значения двух параметров водного баланса – осадков и эвапотранспирации, а также температуры воздуха, которая во многом влияет на величину испарения воды. Данные приведены для пяти месяцев теплого сезона – с мая по сентябрь. Масштаб карт 1 : 25 000 000.

Таким образом, на картах представлено большое разнообразие широтных (зональных) различий гидрологического режима речных бассейнов. Визуальный анализ карт позволяет делать выводы о влиянии различных характеристик растительности, лесистости, температуры воздуха и осадков на величину стока.

3.2 Результаты обработки и визуализация данных дистанционного зондирования продукта MOD16 эвапотранспирация

Для создания тематической карты эвапотранспирации на всю территорию края данные требуют большого объема подготовительной обработки. Предварительная обработка данных включала следующие этапы:

- скачивание сцен продукта за 2019 год (восемь сцен, создающих покрытие территории Красноярского края);
- составление мозаики на территорию края;
- вырезание маской территории края;
- перепроецирование в проекцию UTM зона 46.

Данные эвапотранспирации представлены в единицах $\text{кг}/\text{м}^2/8\text{дней}$ в отличие от размерности в БД BasinATLAS – миллиметры.

На рисунке 14 приведены примеры данных.

Визуальный анализ результатов предварительной обработки показал, что для территории южной части Красноярского края данные содержат полезную информацию с мая по сентябрь месяц. Качество данных сильно зависит от метеорологических условий съемки.

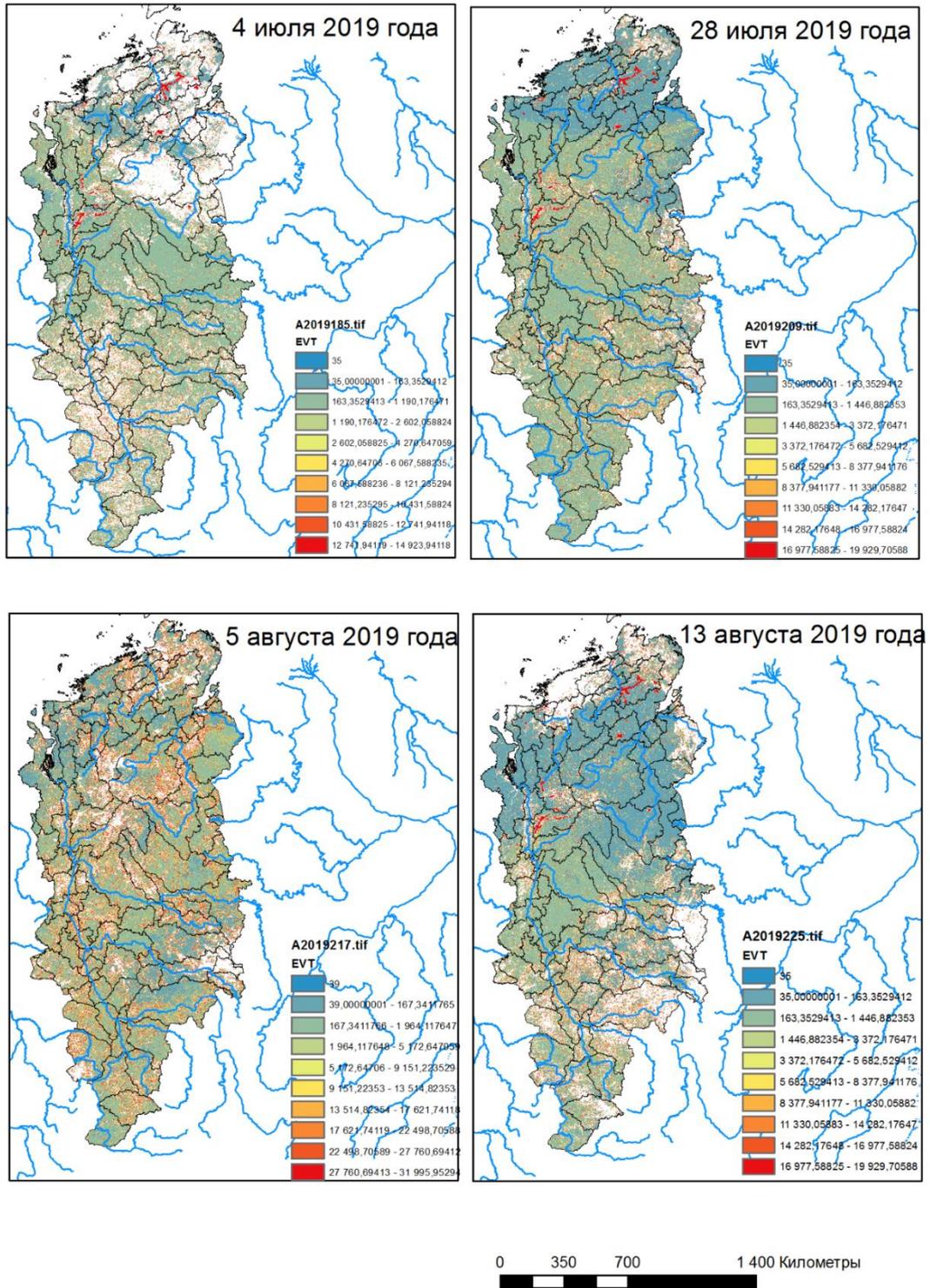


Рисунок 14 – Картограммы эвапотранспирации на основе данных MOD16

Для сопоставления данных эвапотранспирации из этих двух источников необходимо выполнить пересчет в единые размерности и учесть качество данных продукта MODIS.

3.3 Построение бассейнов рек для анализа динамики климатических и гидрологических характеристик

На следующем шаге исследования построены бассейны трех небольших рек центральной части Красноярского края – Качи, Малого Кемчуга и Бузима (рисунок 15). Выбор рек обусловлен небольшими размерами бассейнов, расположением в одной климатической зоне и их смежными границами. При этом речные бассейны существенно различаются по растительности и характеру рельефа. Задача состояла в выделении характеристик бассейнов из имеющихся картографических данных о растительном покрове, цифровой модели рельефа. Все это позволяет облегчить интерпретацию результатов анализа климатико-гидрологических данных для этих бассейнов на следующем этапе исследования, когда информация получена через облачную среду Google EarthEngine.

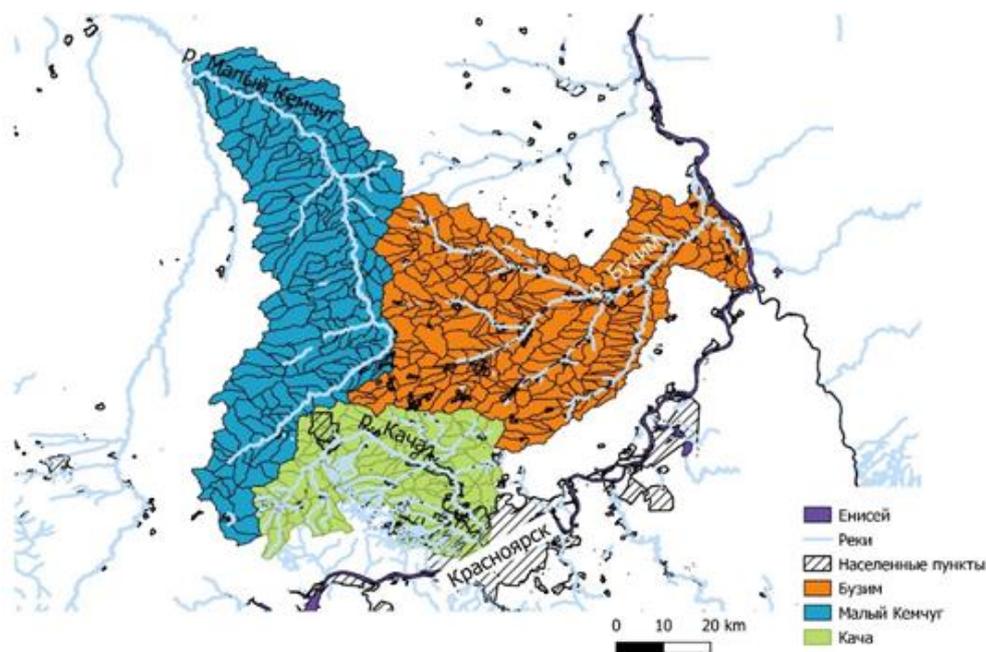


Рисунок 15 – Бассейны рек Малый Кемчуг, Кача, Бузим

Для построения бассейнов использовалась цифровая модель рельефа MERIT DEM с сайта MERIT Hydro: global hydrography datasets. Минимальный охват территории – 5×5 градусов. Данные представлены в системе географических координат WGS84 в формате TIFF.

Были скачаны архивы ЦМР на территорию Красноярского края: (30° с.ш., 90° в.д.), (30° с.ш., 120° в.д.), (60° с.ш., 90° в.д.), (60° с.ш., 120° в.д.) – файлы типа «Adjusted Elevation». Для конвертации скачанных ЦМР, совместного анализа и контроля результатов, а также создания карт используется QGIS с модулями GRASS версии 2.18. После установки программы Whitebox GAT и скачивания исходных данных ЦМР выполнялись следующие операции.

Проведена конвертация растров в проекцию UTM-46, в формат TIF без сжатия с помощью библиотеки GDAL в QGIS с использованием командных

файлов bat, собрана мозаика и обработана маской для выделения территории центральных и южных районов Красноярского края.

Для автоматического построения компонентов гидрологической карты использовалось программное обеспечение Whitebox GAT [36]. После его запуска загружается растр ЦМР и выполняется алгоритм Breach Depression (Fast) для корректировки ЦМР (устранения дефектов). В результате 3 растровых слоя:

- Breach – модифицированный, корректный с точки зрения гидрографии рельеф (ЦМР, свободная от локальных понижений);
- Flow Pointer – растр направлений стоков, содержащий в ячейках информацию о направлении движения потока; на его основе рассчитываются линии водотоков и контуры речных бассейнов; ячейки растра содержат информацию в целочисленном виде о направлении стоков по сторонам света;
- Flow Accumulation – растр суммарного потока; каждый пиксель этого растра отображает то количество ячеек, по которым перемещается условный водный поток к данной ячейке.

Далее выполняется операция Stream extraction, в которой нужно задать пороговое значение – в данном примере 15000. Это значение – количество пикселей, составляющие минимальный водосборный бассейн. Значение 15000 соответствует бассейнам с площадью порядка 50–150 км². Уменьшение порогового значения будет приводить к увеличению количества определяемых потоков и, следовательно, бассейнов. Это нужно для построения бассейнов для крупномасштабного картографирования.

Далее выполняется экспорт потоков (streams) в векторный формат (shp файл). Получается векторный линейный слой водотоков.

Конечным этапом при формировании бассейнов является алгоритм Sub-Basins. При выборе слоев, по которым будет происходить расчет алгоритма, первым слоем выбираем слой Extract Streams и слой Flow_accum, полученный на первом этапе. Каждый отдельный поток, вычисленный на этапе работы алгоритма Extract Streams получает свой бассейн.

Полученный растровый слой представляет зоны, соответствующие водосборным территориям или бассейнам для каждого потока в соответствии с заданным в операции Extract Streams пороговым значением, определяющим масштаб данных. Затем полученный растр с водосборными бассейнами экспортируется в векторный полигональный формат.

В итоге создается shape-файл vec.shp. Таким образом, после работы с ПО Whitebox GAT получают два векторных слоя: линейный слой потоков и полигональный слой бассейнов.

Теперь надо устранить «артефакты» (векторные ячейки размером в один или несколько растровых пикселей) и сгладить «зубчатые полигоны», которые могут быть в shp-файле. Открываем этот слой в QGIS. Запускаем алгоритм из набора GRASS – v.clean.advanced с параметрами prune и rarea:

- prune – отвечает за удаление близко расположенных узлов линий и границ. Если обрабатывается граница полигона, то топология не нарушается

за счёт того, что первый и последний сегмент границы никогда не изменяются и, кроме того, полигоны и их центры никогда не удаляются. Используется классический алгоритм Дугласа-Пекера.

– *marea* – предназначен для удаления полигонов с заданным площадным порогом.

В данной работе удаляются узлы линий и границ, расположенные на расстоянии 50 метров и удаляются полигоны с площадью меньше 10000 м².

Последний шаг – генерализация линий (устранение зубчатости) выполняется алгоритмом из набора GRASS – *v.generalize.smooth* методом *chaiken*. Устанавливается пороговое значение (*Maximal tolerance value*) 30 метров (с учетом того, что рельеф имеет разрешение около 75 м). Остальные параметры – по умолчанию. В результате создается новый векторный слой с результатом генерализации.

Редактирование в ручном режиме необходимо провести на отдельных участках территории, где наблюдаются ошибки в данных исходного рельефа, либо рассматривается территория озер/водохранилищ большого размера.

В таблице 3 приведены характеристики рельефа бассейнов, полученные из цифровой модели рельефа.

Таблица 3 – Характеристики рельефа бассейнов рек Бузим, Малый Кемчуг, Кача

Бассейн	Площадь, км ²	Минимальная высота над у.м., м	Максимальная высота над у.м., м	Перепад высот, м	Средняя высота над у.м., м
Бузим	2603,72	111.0	426.8	315.8	250.0
Малый Кемчуг	2486,90	215.0	606.7	391.7	338.2
Кача	1252,54	134.2	706.9	572.7	335.2

Для детализации динамики лесного покрова использованы дынные из слоев *gain* и *loss* [32], данные приведены в Приложении В.

Используя карту растительности РФ, получены следующие характеристики растительного покрова бассейнов. В бассейне реки Кача 48,38% – леса разного породного состава, 13,39% – поля, 26% – травяные сообщества. В бассейне реки Бузим 35,62% – травяные сообщества, 24,13% – поля, 28,4% – леса. 94,5% бассейна реки Малый Кемчуг занимают леса, примерно половину из них составляют темнохвойные и смешанные с участием темнохвойных леса.

На рисунке 16 показаны данные из слоя о проективном покрытии [32].

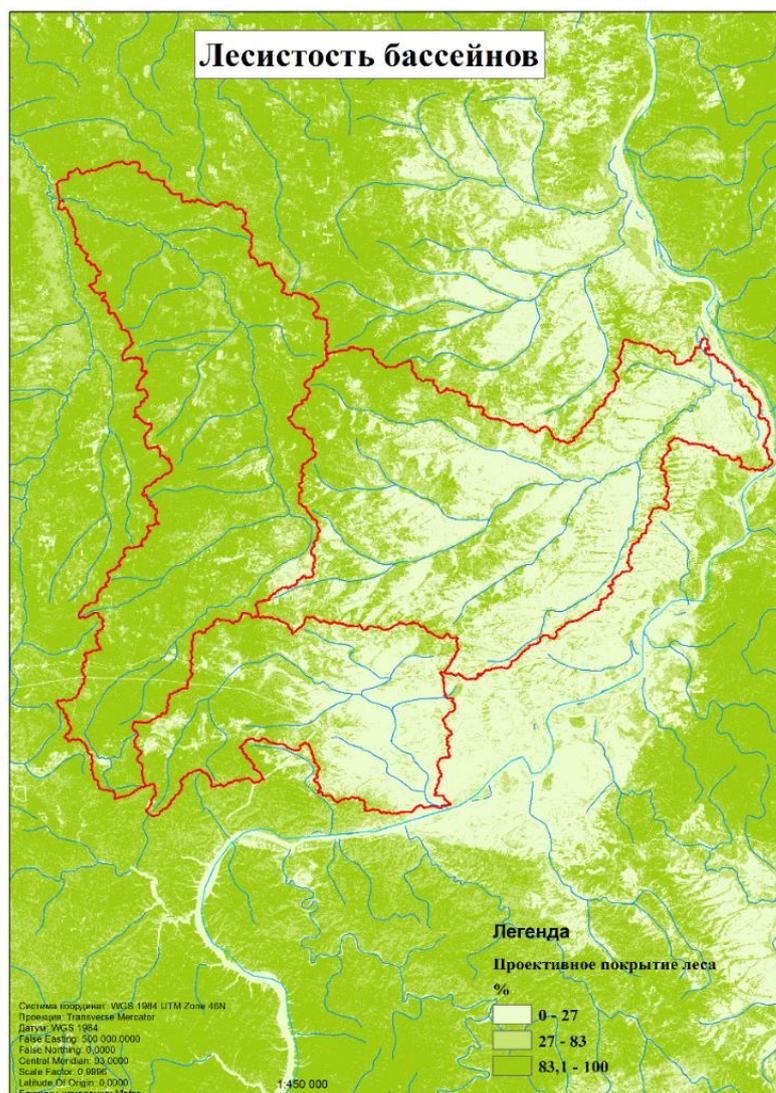


Рисунок 16 – Проективное покрытие древесной растительностью

Очевидно различие в характере растительного покрова трех бассейнов. В бассейне Малого Кемчуга отсутствуют значительные участки нелесной территории (сельскохозяйственных угодий, травяных сообществ). В бассейне р. Кача лесной покров присутствует в верховьях. Ниже по течению большая часть территории занята сельскохозяйственными угодьями, лугами, а также населенными пунктами. В бассейне реки Бузим лесной покров занимает 25%.

Изменения лесного покрова незначительны, не превышают 3% от площади бассейна (Приложение В). Появление новых лесов: Бузим 1.3%, Кача 0.8%, Кемчуг 3.3%. Уменьшение лесного покрова: Бузим 2.0%, Кача 0.98%, Кемчуг 2.9%. В целом динамику изменения лесного покрова можно считать незначительной.

4 Анализ данных в Google Earth Engine

При извлечении данных из БД ERA5-Land нужно учитывать, что в ней хранятся средние дневные показатели для каждого месяца. Для температуры это средняя температура, обычно использующийся в исследованиях параметр. Для таких характеристик, как осадки, испарение, сток нужно получить среднемесячные, суммарные значения. Для этого и других задач необходимо разработать специальные программы:

- суммирования данных за заданный период времени;
- суммирования данных по площади;
- построение коэффициентов линейного тренда и получение результата в виде растра;
- извлечения данных по маске растрового формата.

4.1 Извлечение значений по маскам

4.1.1 Получение средних месячных значений для бассейнов

Приведенный скрипт (Приложение Г.1) предназначен для получения графика (chart) параметров из набора – среднее значение по бассейну. Добавлена операция умножения на 1000 данных, которые имеют значения меньше, чем 0.001 (это перевод единиц осадков и стока из метров в миллиметры). Без умножения такие значения теряют значимые разряды при выгрузке в формате CSV.

На рисунке 17 показано рабочее окно, в котором отображена часть кода для визуализации данных температуры на уровне 2 м, изображение этого параметра в окне карты и график среднемесячной температуры для полигона – бассейна реки Кача.

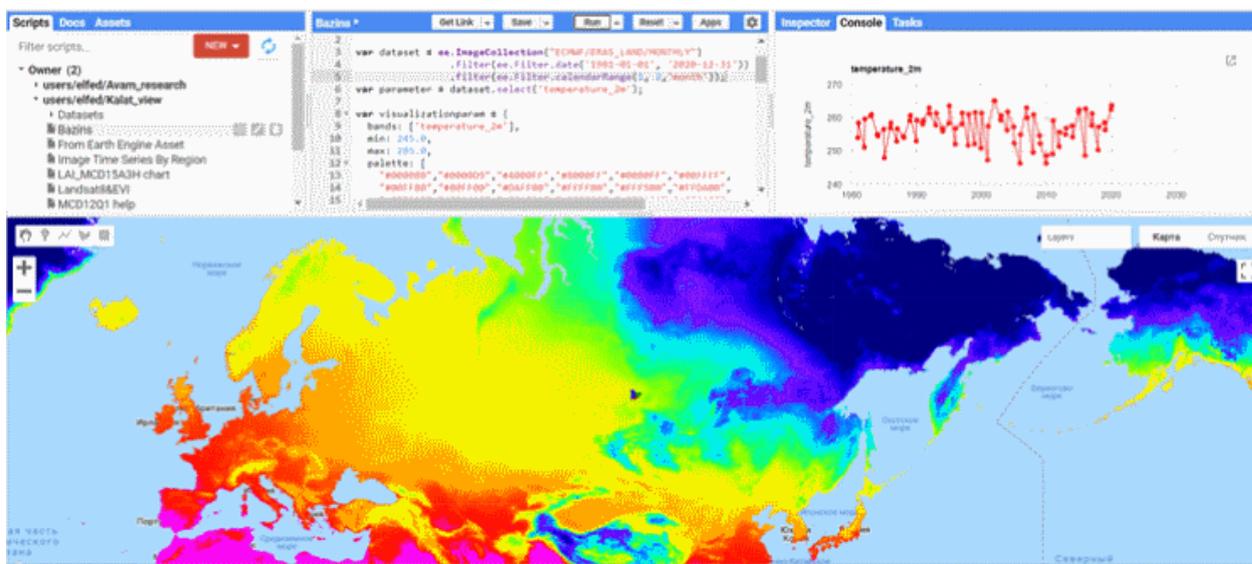


Рисунок 17 – Рабочее окно Google Earth Engine Code

Данные выгружаются из графика в формате CSV, потом импортируются в таблицы Excel. Данные выгружаются ежемесячно для каждого бассейна отдельно.

В набор данных для анализа были выбраны ежемесячные данные с января 1981 года по ноябрь 2020 года по следующим параметрам:

- temperature_2m, температура воздуха на высоте 2 м над поверхностью;
- snow_depth_water_equivalent, водный эквивалент снежного покрова;
- potential_evaporation, потенциальное испарение;
- runoff, сток;
- total_evaporation, общее испарение;
- total_precipitation, общее количество осадков.

Данные собраны в файлы для каждого бассейна – рек Бузим, Кача и Малый Кемчуг.

Далее проведен корреляционный анализ в Microsoft Excel и получены корреляционные коэффициенты оценки статистической зависимости данных. Выбраны статистически значимые коэффициенты корреляции, из них – со значениями по модулю не меньше 0,3. Поведение коэффициентов корреляции для каждого бассейна имеет много общего.

Следующий шаг – анализ трендов данных за 40 лет, также в Microsoft Excel. По всем показателям построены тренды месячных значений, характеризующие динамику климатических параметров в 1981–2020 годах.

4.1.2 Извлечение данных в отдельных пикселях

На следующем шаге проведен анализ не средних значений по бассейнам, а значений в отдельных пикселях данных ERA5-Land внутри бассейнов.

В Приложении Г.2 приведен листинг для вывода значений выбранных параметров в указанном пикселе данных для сравнения характеристик на участках бассейнов с разным растительным покровом.

4.1.3 Создание маски растровыми данными

Для выделения анализируемой территории, кроме векторных объектов, есть необходимость выделять из данных ERA5-Land значения с помощью растровых масок из других наборов растровых данных. В Приложении Г.3 приведен листинг программы для решения этой задачи. В данной программе выводится медианное значение температуры воздуха с апреля по октябрь с 2016 по 2020 годы на участках гарей 2018 года, выделенных маской из данных о горях продукта MCD64.

4.2 Визуализация снимков Landsat и Sentinel-2

Для визуализации данных дистанционного зондирования используется код создания imagecollection из баз данных снимков Landsat-5, Landsat-7,

Landsat-8 и извлечения из коллекции изображений за интересующий период времени по годам, по месяцам, по параметру. В представленном в Приложении Г.4 коде выполняется вывод в окне карты растра с исчезнувшим лесным покровом [32] и снимков Landsat. Выделенный шрифт изменялся для выбора данных Landsat и для их лучшей визуализации.

4.3 Программы вычисления средних значений за период, суммарных за период, трендов и их визуализация

4.3.1 Общий подход

База данных ERA5-Land содержит данные в виде средних дневных значений для каждого месяца. Эта величина для таких параметров, как температура, содержание влаги в почве и т.п., напрямую подходит для использования в работе, как это принято сейчас для среднемесячных значений.

Для получения месячных значений параметров, которые должны суммироваться по всем дням месяца (осадки, испарение, сток и т.п.), необходимо написать специальную функцию. Другая функция необходима для суммирования данных за период на территории, например, для стока, осадков, испарения со всей территории бассейна или водосбора.

Средство называется «Map an expression over a collection».

Сначала определяется функция, которая выполняется для каждого изображения из коллекции, например, вычисление вегетационных индексов.

Листинг 1 – Построение функции

```
// A function to compute NDVI.
var NDVI = function(image) {
  return image.expression('float(b("B4") - b("B3")) / (b("B4") +
b("B3"))');
};
// A function to compute Soil Adjusted Vegetation Index.
var SAVI = function(image) {
  return image.expression(
    '(1 + L) * float(nir - red) / (nir + red + L)',
    {
      'nir': image.select('B4'),
      'red': image.select('B3'),
      'L': 0.2
    }
  );
};
```

Затем вычисленные данные визуализируются в окне карты.

Листинг 2 – Визуализация данных в окне карты

```
Map.addLayer(collection.map(NDVI).mean(), vis, 'Mean NDVI');
Map.addLayer(collection.map(SAVI).mean(), vis, 'Mean SAVI');
```

Значение индексов напрямую можно узнать кликом на данных в закладке Inspector.

4.3.2 Вычисление суммы значений пикселей в коллекции

Рассмотрим пример, когда необходимо вычислить медианное значение временного ряда изображений, представленных в виде `ImageCollection`. Для этого используются методы `imageCollection.reduce()`, что сокращает коллекцию изображений до отдельного изображения, как показано на рисунке 18. В частности, выходные данные вычисляются по пикселям, так что каждый пиксель в выходных данных состоит из медианного значения всех изображений в коллекции в этом месте. Чтобы получить другие статистические данные, такие как среднее значение, сумма, дисперсия, произвольный процентиль и т. д., следует применить соответствующий редуктор.

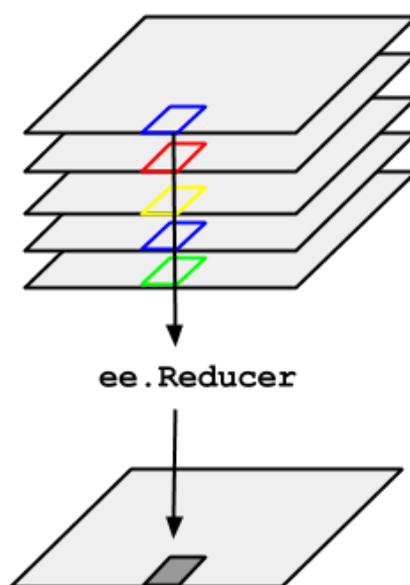


Рисунок 18 – Иллюстрация, поясняющая работу метода `ee.Reducer` для `ImageCollection`

Для базовой статистики, такой как `min`, `max`, `mean` и т. д., `ImageCollection` имеет методы быстрого доступа, такие как `min()`, `max()`, `mean()` и т. д.

Была составлена программа вычисления суммарных месячных значений для стока, транспирации, осадков.

Листинг для расчета месячного стока (`runoff`) и построение его графиков для двух бассейнов, заданных `FeatureCollection baz_moth` и состоящей из двух полигонов, имеющих каждый свой идентификатор `HYBAS_ID`, представлен в Приложении Д.

4.4 Вычисление коэффициентов линейного тренда

Для анализа трендов изменения параметров по узлам сетки (гридам) и по бассейнам необходимы функции построения трендов `formaTrend` (`covariates`, `windowSize`).

Вычисляются долгосрочные и краткосрочные тренды временного ряда или, необязательно, тренды отношения временного ряда и ковариаты. Долгосрочный тренд оценивается по линейному члену регрессии на полном временном ряду. Краткосрочный тренд рассчитывается как оконный минимум для временного ряда. Ожидается, что временной ряд и ковариативный ряд будут содержать по одному растру каждый, а временной ряд будет равномерно распределен во времени.

Результатом являются четыре растра в формате с плавающей запятой: долгосрочные `long-trend` и краткосрочные `short-trend` тренды, t-тест долгосрочного тренда `long-tstat` по отношению к временным рядам и тест Брюса - Хансена на стабильность параметров `hansen-stat`.

На рисунке 19 показаны в качестве примера тренды апрельских температур с 2000 по 2020 год на территории северной Евразии.

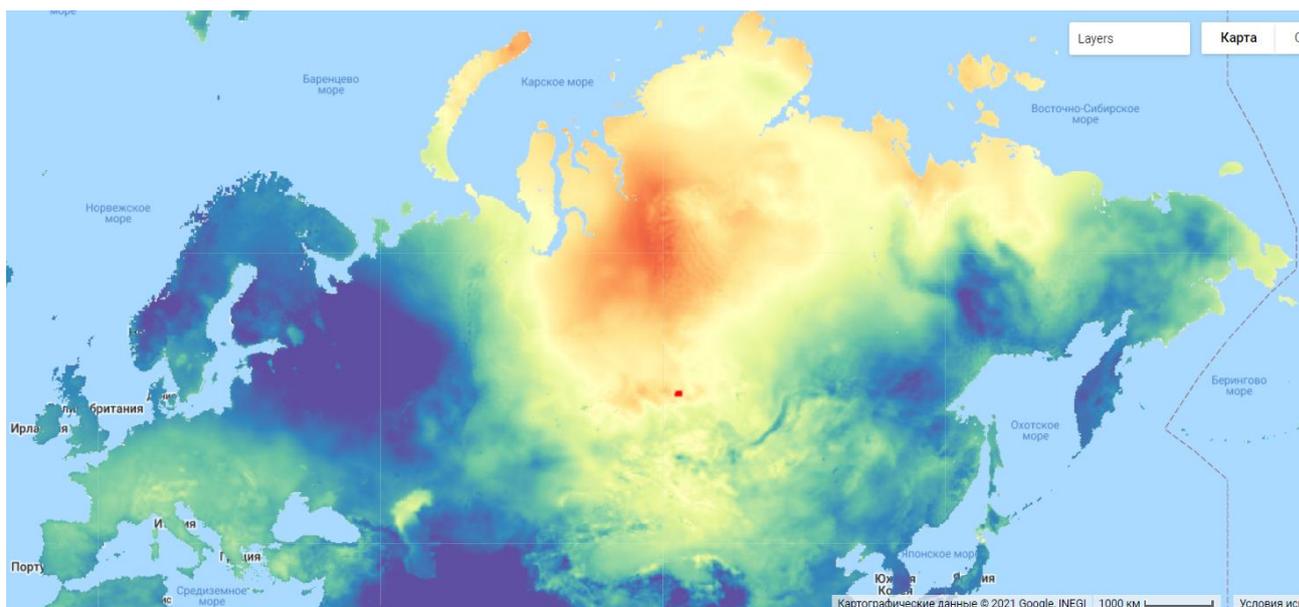


Рисунок 19 - Тренды апрельских температур 2000- 2020 годы

Максимальные положительные коэффициенты линейного тренда наблюдаются на территории севера Красноярского края.

На рисунке 20 представлен результат вычисления линейного тренда стока в апреле месяце, вырезанного по маске полигонального слоя бассейна реки Кача.

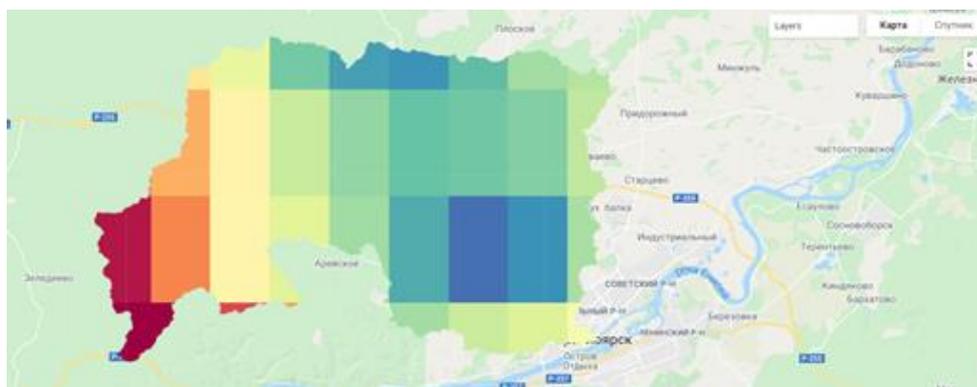


Рисунок 20 - Тренд апрельского стока 2000- 2020 годы, по маске бассейна реки Кача

Визуализация настроена так, чтобы максимально выделить различие в коэффициентах линейного тренда по бассейну. Различия статистически не значимы, но выявляется тенденция: все тренды отрицательные, и в верховьях р. Кача тренд самый минимальный, к устью тренд уменьшения стока больше.

5 Анализ пространственного распределения и временной динамики климатических и гидрологических параметров территорий

5.1 Динамика климатико-гидрологических параметров в бассейнах рек Бузим, Малый Кемчуг и Кача

5.1.1 Динамика средних значений параметров

Температура

Во всех бассейнах наблюдается тенденция понижения январской температуры и повышение весенних и летних температур. Особенно выражен тренд роста апрельских температур, коэффициент детерминации R^2 в бассейне Малого Кемчуга равен 0.25, в бассейне Качи – 0.27, в бассейне Бузима – 0.29 (рисунок 21).

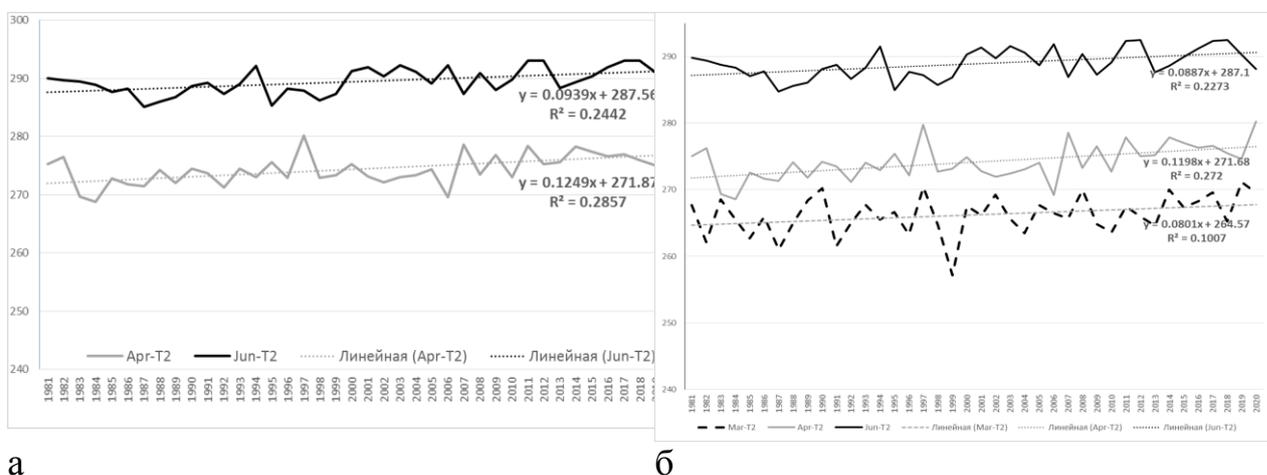
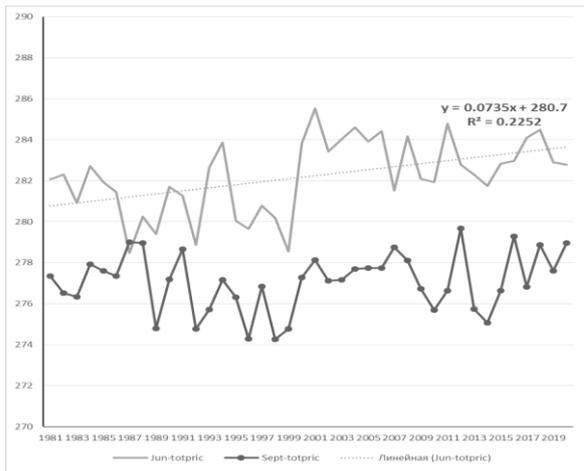


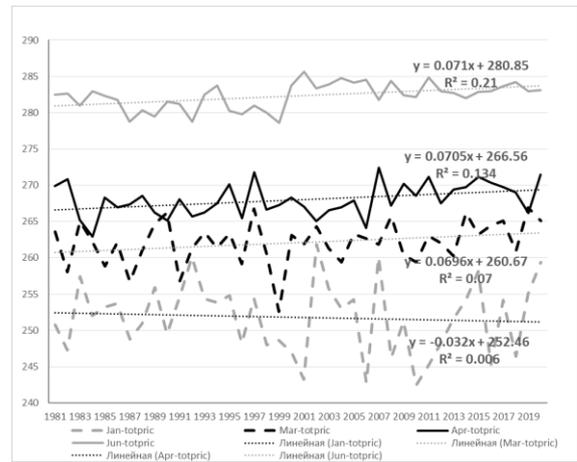
Рисунок 21 – Динамика среднемесячной температуры (среднее по бассейну): а – бассейн реки Бузим, б – бассейн реки Кача

Осадки

Во всех трех бассейнах максимальное количество осадков выпадает в летние месяцы, а тенденция роста осадков в июне больше, чем в июле и в августе (рисунок 22).



а

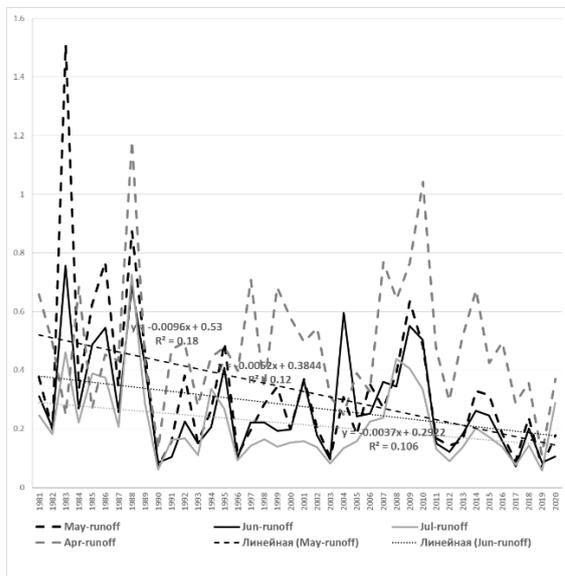


б

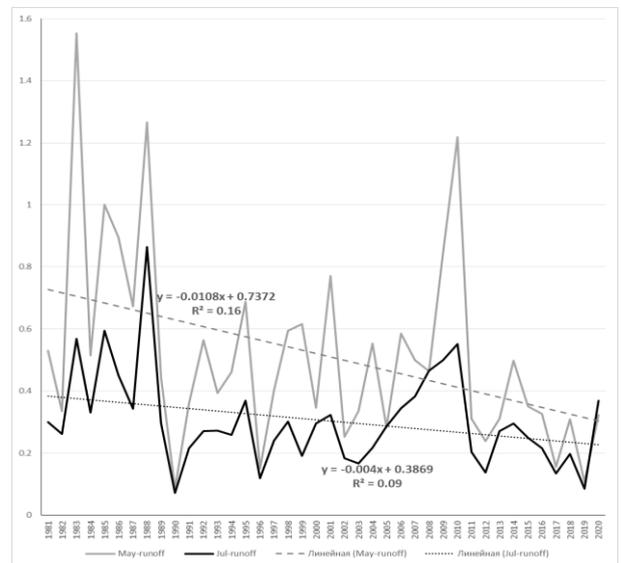
Рисунок 22 – Тенденции месячных осадков : а - в бассейне реки Малый Кемчуг, б – в бассейне реки Бuzим

Сток

В летние месяцы во всех трех бассейнах имеется тенденция уменьшения стока (рисунок 23). Сток апреля в Малом Кемчуге имеет тенденцию к увеличению, в остальных двух бассейнах тенденция увеличения отсутствует.



а

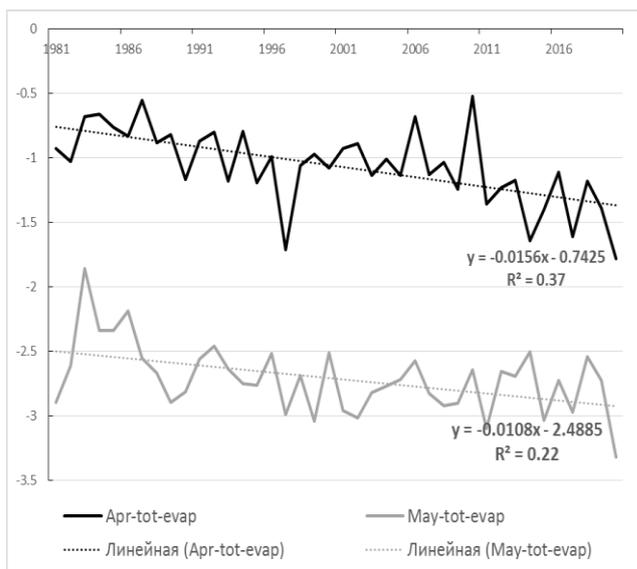


б

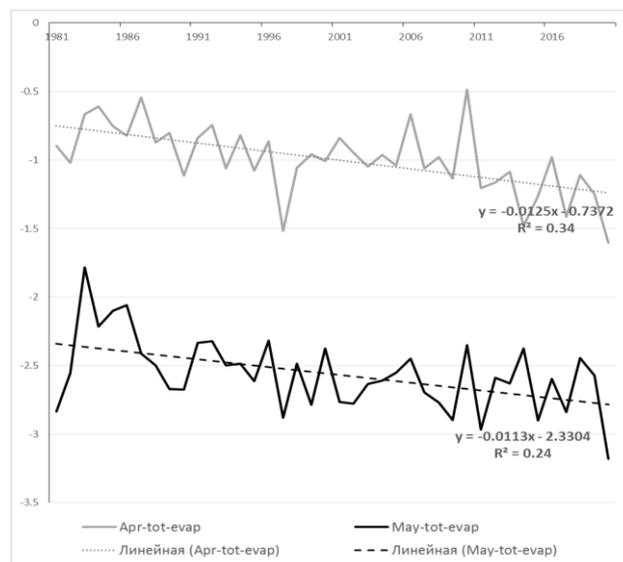
Рисунок 23 – Динамика стока в бассейнах рек (среднее по бассейну): а – Бuzим, б – Кача

Общее испарение

В течение теплого сезона есть тенденция увеличения испарения во всех бассейнах, наиболее значительные тренды в апреле, мае и июне (рисунок 24).



а



б

Рисунок 24 – Динамика общего испарения: а – в бассейне реки Бузим, б - в бассейне реки Кача

Увеличение испарения в летние месяцы можно связать с тенденцией роста летних температур. Обе эти причины могут объяснить снижение стока.

5.1.2 Сравнительный анализ параметров

Было проведено сравнение значений и динамики климатических и гидрологических параметров между тремя бассейнами.

Температура и осадки изменяются синхронно и имеют одинаковые среднемесячные значения за весь период наблюдения для всех бассейнов. Поэтому можно считать, что ни температура, ни осадки в целом по бассейну не определяют различия в динамике остальных параметров – общего испарения, стока и водного эквивалента снежного покрова.

Общее испарение

В августе, сентябре и октябре этот параметр от бассейна к бассейну изменяется мало, динамика по годам синхронна. В апреле, мае и июне испарение в бассейне Малого Кемчуга меньше, чем в бассейнах Качи и Бузима. В июле, наоборот, испарение больше, хотя не так значительно. Это наблюдается за весь период 1981-2020 годы (рисунок 25).

Уменьшение испарения во всех трех бассейнах в июле в период 2006-2011 годы не связано с ростом температуры или осадков.

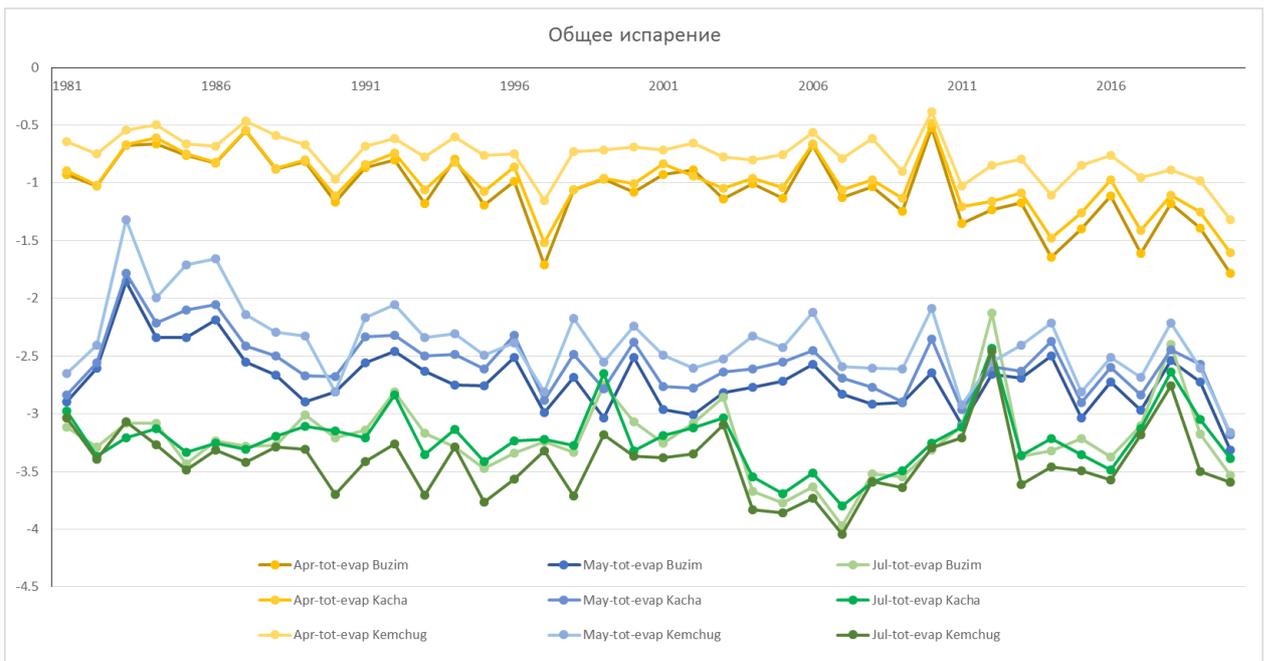


Рисунок 25 – Динамика среднемесячных значений общего испарения

Водный эквивалент снежного покрова

В бассейнах Качи и Бузима величина водного эквивалента снежного покрова практически одинакова. В бассейне Малого Кемчуга наблюдается более высокое значение в марте и в апреле месяце, когда наблюдаются максимальные накопленные запасы снега (рисунок 26).



Рисунок 26 – Динамика водного эквивалента снежного покрова в марте и в апреле месяце

Такие соотношение наблюдается за весь исследуемый период.

Сток

Рассматривая стоки в апреле-сентябре, отмечается самое высокое значение – майский сток в бассейне Малого Кемчуга. В бассейне Бузима самый высокий сток в апреле, в бассейне Качи сток делится на майский и апрельский (рисунок 27).

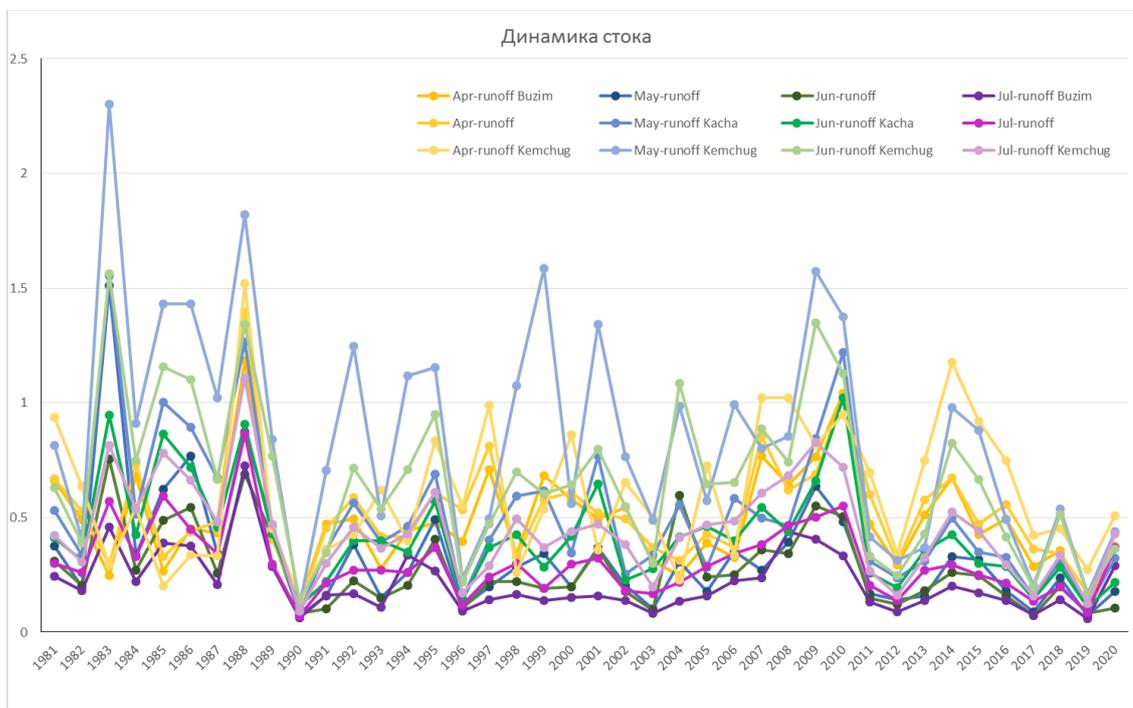


Рисунок 27 – Динамика стока в весенние и летние месяцы

Максимальная величина стока наблюдается в апреле в бассейне Бузима, в мае в бассейне Малого Кемчуга и в апреле-мае в бассейне Качи. В последнее десятилетие величина среднего стока весной уменьшилась примерно в два раза.

5.1.3 Анализ данных в отдельных пикселях, соответствующих территориям с разными характеристиками растительного покрова

На следующем шаге проведен анализ значений в отдельных пикселях данных ERA5-Land внутри бассейнов. Внутри бассейнов выбраны пиксели, соответствующие разному типу растительного покрова – леса или поля. Для выбора пикселей использовались слои границ бассейнов, подложка «Спутник» в Google Earth Engine и два снимка 2020-2021 годов – зимний и летний, на которых хорошо визуально выделяются разные типы подстилающей поверхности.

Рассмотрим динамику стока в бассейне Бузима в лесу и на полях (рисунок 28). Представлены графики динамики стока в апреле и в мае месяце с 2000 по 2020 год. Сток в апреле больше, чем в мае.

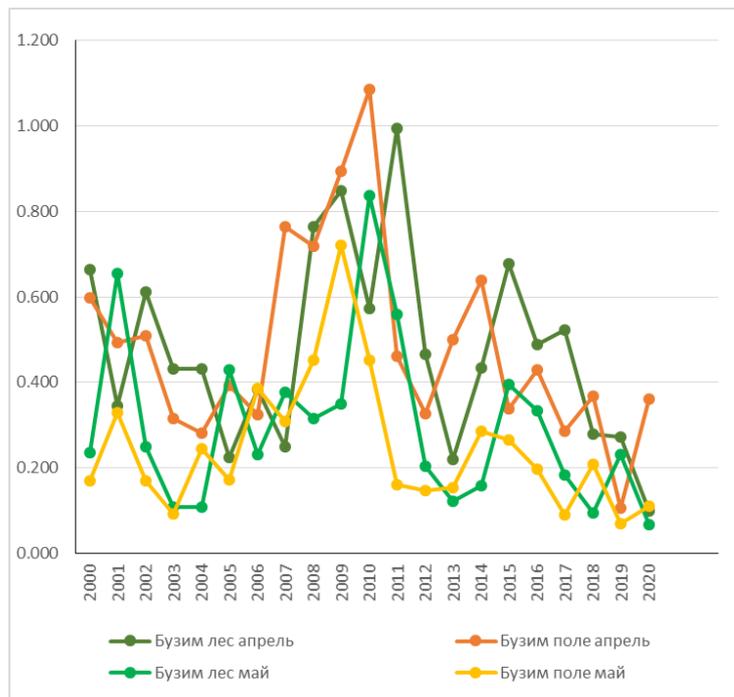


Рисунок 28 – Динамика стока в полях и лесах в бассейне Бузима

В течение всего периода 2000-2020 годов самая большая величина стока наблюдается в мае месяце в лесных территориях бассейна реки Кемчуга. В лесных территориях бассейна Кача сток меньше, и его максимум приходится на апрель чаще всего (рисунки 29-30). В бассейне Бузима динамика стока по времени и по величине одинаковая как в полях, так и в лесной части. Это может быть связано также с тем, что лесные территории небольшие по площади.

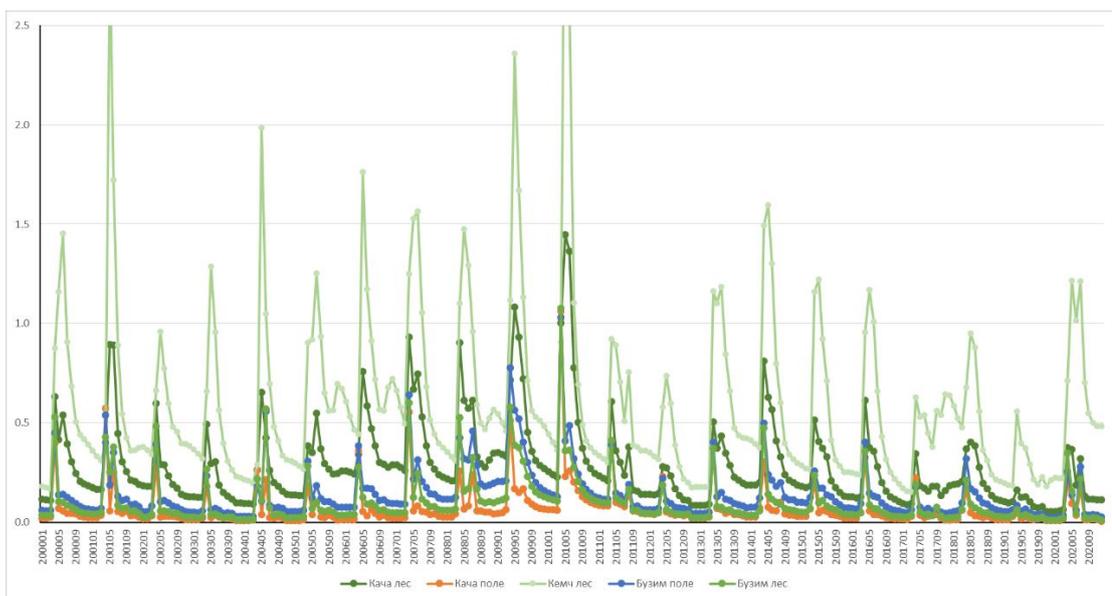


Рисунок 29 – Динамика стока в бассейнах в лесных и сельскохозяйственных территориях в течение года

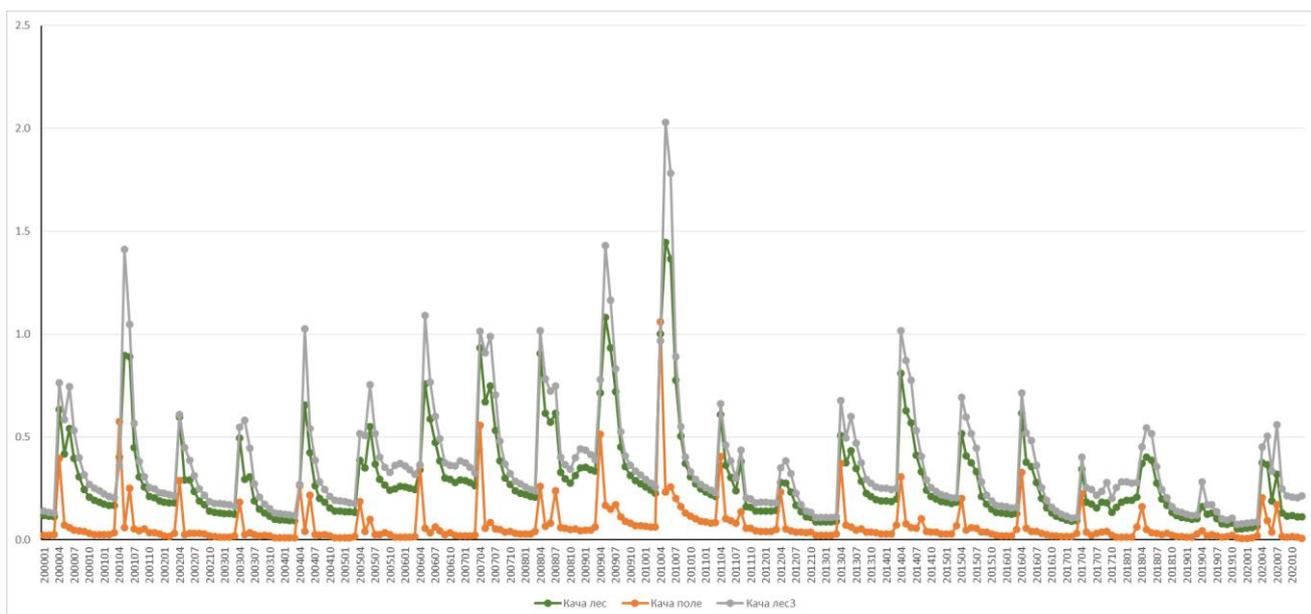


Рисунок 30 – Динамика стока в бассейне Качи на участках с лесной растительностью и сельскохозяйственными угодьями

Анализ показывает, что внутри бассейна существуют различия в режиме стока в зависимости от типа подстилающей поверхности. Сток на лесных участках выше, чем на территории сельскохозяйственных угодий, и максимум стока наблюдается в полях на месяц раньше, чем в лесу. Вместе с тем и на лесных территориях сток различается по величине, хотя приходится на один и тот же месяц (май).

5.2 Исследование динамики гидрологических показателей в бассейнах рек с существенными изменениями лесного покрова

Анализ изменения величины стока на территориях, где площадь лесного покрова существенно изменяется, имеет большое практическое значение, в первую очередь для предупреждения опасных ситуаций типа наводнений. Изменения лесного покрова, в основном его гибель на значительной части бассейна реки, наступает в результате вспышек массового размножения насекомых-вредителей, например, сибирского шелкопряда, вырубки леса или пожаров. Использование данных в гидрологических, климатических базах данных, данных дистанционного зондирования и результатов их анализа, очень продуктивно проводить в облачной среде. Пример применения облачной среды Google EarthEngine приведен в работе [37].

Были вырезаны фрагменты на территорию Эвенкии, включая поселок Тура, для изучения влияния пожаров, и бассейны рек Каса и Сыма для изучения влияния последствий вспышки массового размножения сибирского шелкопряда. Контур бассейнов выделены из набора данных HydroSHEDS

[38]. Из данных [32] forestloss были вырезаны фрагменты с территориями исчезновения лесов в исследуемых регионах (рисунок 31).

Наиболее значительная гибель древостоев в пределах бассейнов Каса и Сыма произошла в 2013, 2016 и 2017 годах (рисунок 31). Для получения гидрологических параметров для этих территорий был построен векторный полигональный слой наиболее концентрированных участков повреждений для каждого года. Для каждого месяца или только летних или только зимних месяцев для трех исследуемых участков с помощью программы выделения параметра и построения графика его динамики для каждого полигона векторного слоя (идентификация по полю «год гибели») получены средние значения параметров (среднее в день):

- температура воздуха;
- общий сток;
- осадки;
- водный эквивалент снежного покрова;
- испарение.

Данные экспортированы в формате CSV.

По абсолютным значениям этих характеристик различий по участкам не выявлено. На рисунках 32 – 33 приведены графики аномалий стока, осадков и водного эквивалента снежного покрова относительно среднего значения в день с 2006 по 2020 год. Аномалии рассчитаны в Microsoft Excel. Увеличение майского стока на всех трех участках в 2014–2015 годах, уменьшение майского стока в период 2009–2013 годы сопровождается соответствующими колебаниями снегозапаса (водного эквивалента) и отчасти осадков.

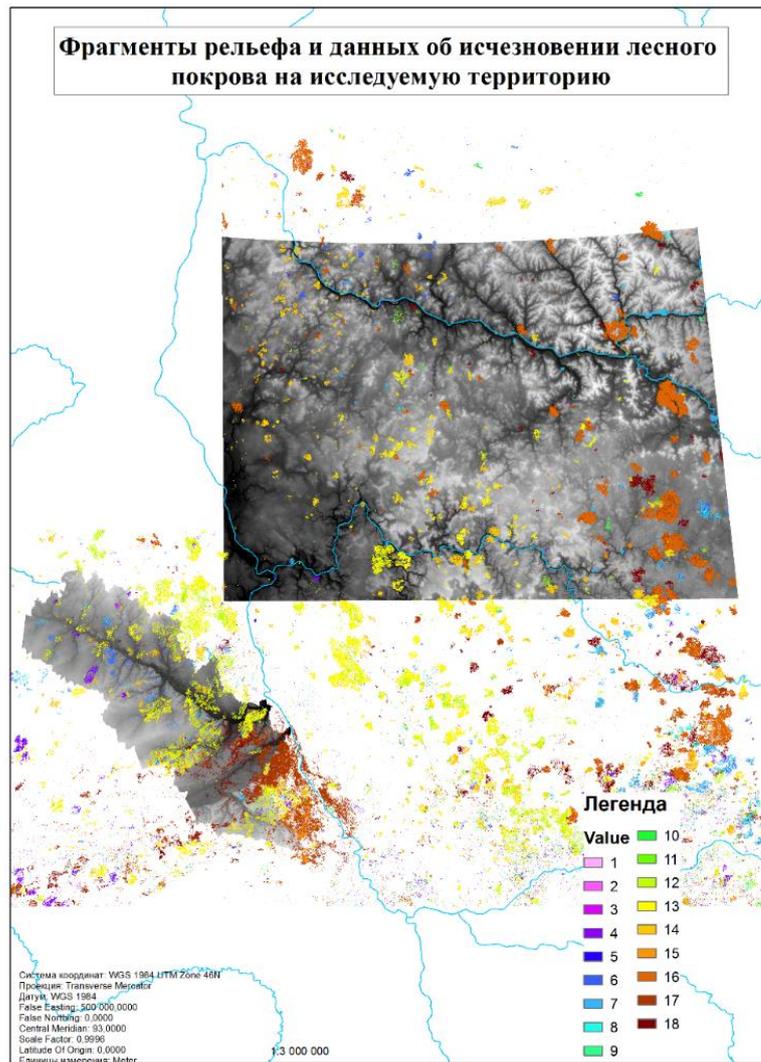


Рисунок 31 – Исследуемая территория. В легенде показаны годы исчезновения лесного покрова в XXI веке

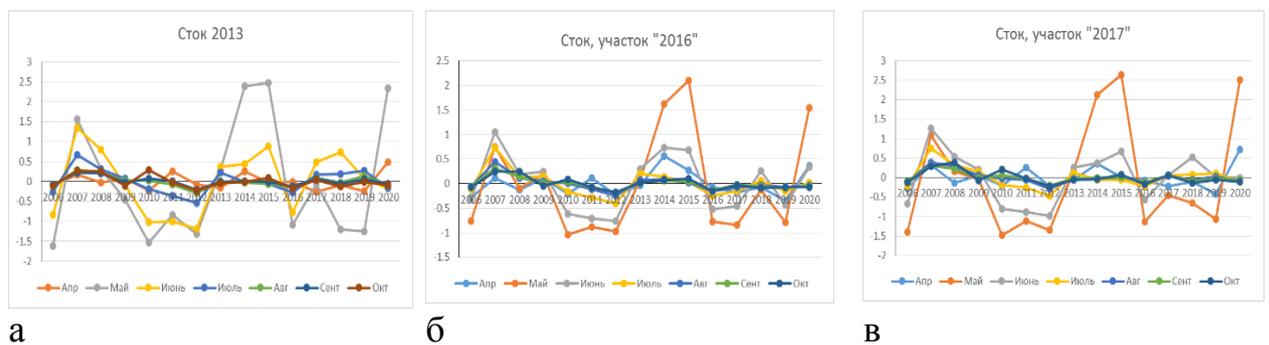
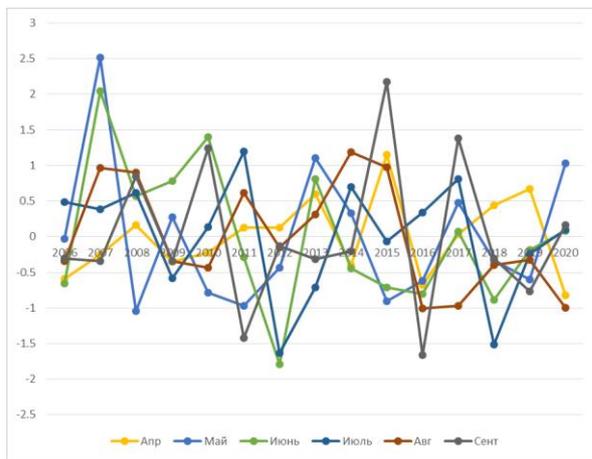
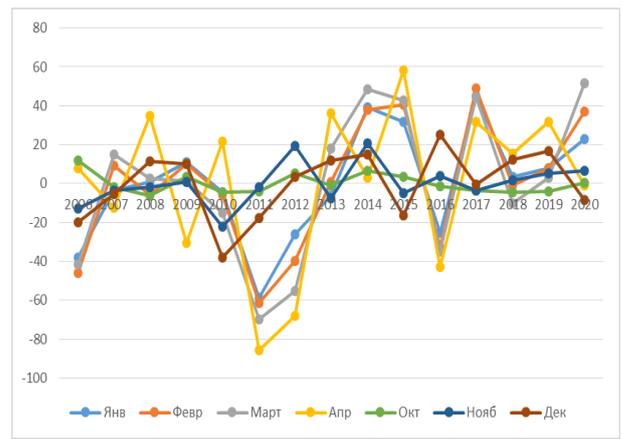


Рисунок 32 – Динамика аномалий стока, средние значения в день за месяц на участках погибших лесов: а – в 2013 г., б – в 2016 г., в – в 2017 г.



а



б

Рисунок 33 – Динамика аномалий осадков (а) и водного эквивалента снега (б) для повреждений 2016 г.

Был проведен анализ вышеперечисленных параметров для бассейнов рек Сыма и Каса. На рисунке 34 показаны графики месячных значений стока для этих бассейнов в рабочем окне EarthEngine.

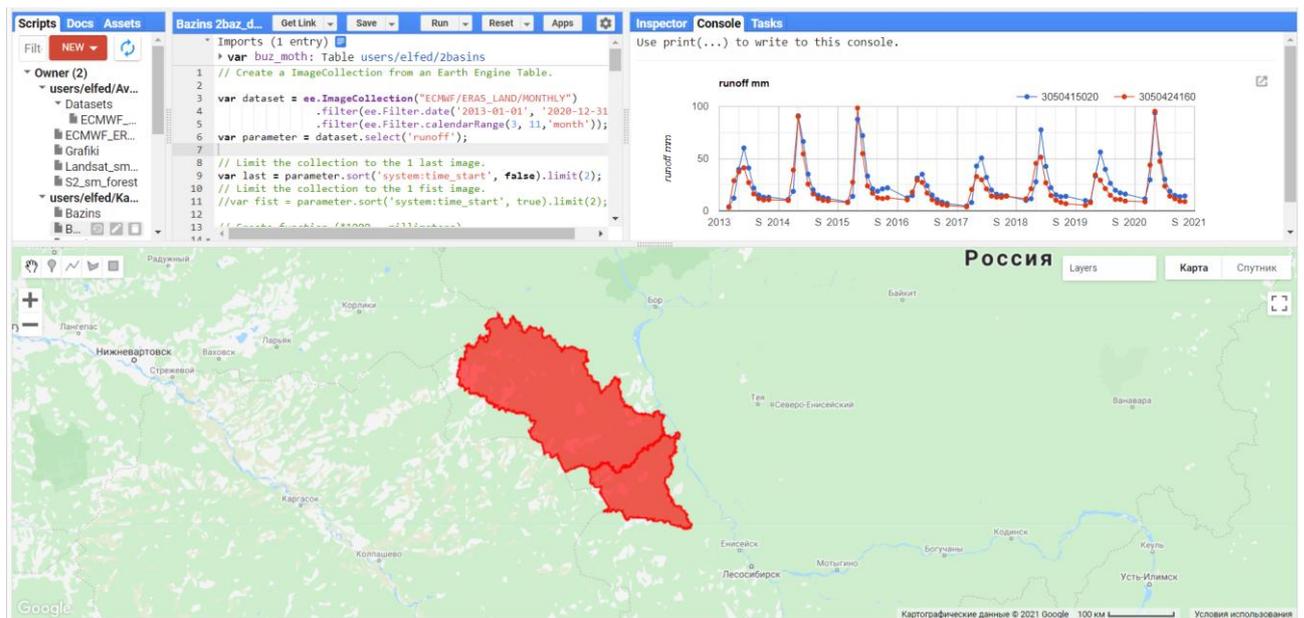
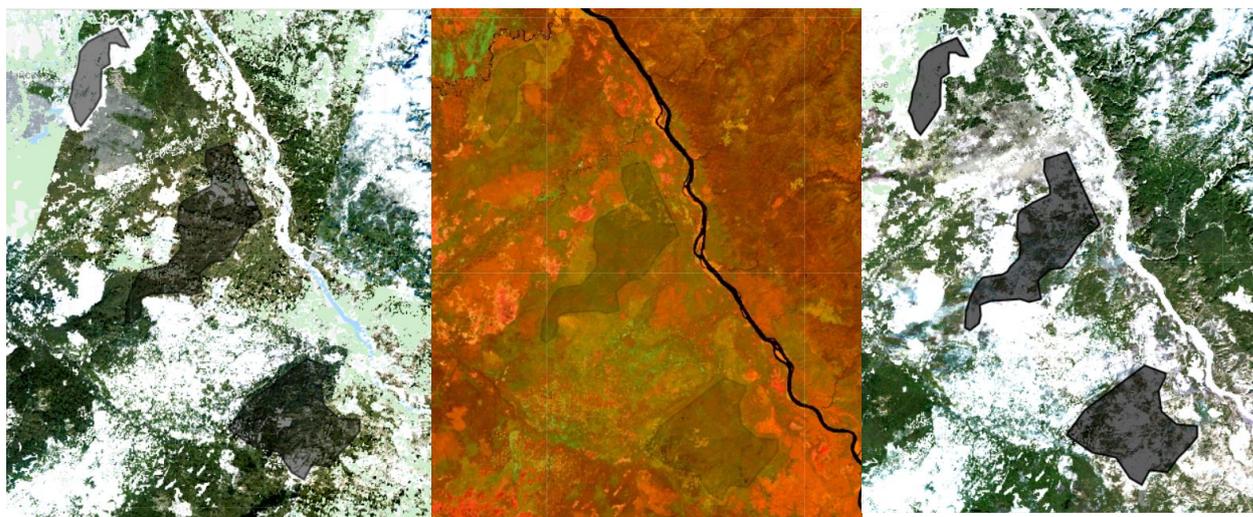


Рисунок 34 – Графики динамики стока в бассейнах Сыма и Каса с 2010 по 2020 год (месяцы март-ноябрь) в консоли

Изменения стока после гибели лесного покрова в бассейнах рек, а также отдельно на участках гибели леса вне связи с осадками и количеством снежных запасов в 2015-2010 годах не наблюдается. Поэтому была визуализирована динамика изменения растительного покрова территории по снимкам Landsat-8 (рисунки 35 – 36).

На снимках 2012 года массовых повреждений лесного покрова не проявляется на всей исследуемой территории. На летних и зимних снимках

2020-2021 годов (рисунок 33) территории с погибшими лесами выделяются как участки разной степени заснеженности.



Зима 2020 г.

Лето 2020 г.

Зима 2021 г.

Рисунок 35– Исследуемая территория на летних и зимних снимках Landsat 8 за период 2020-2021 годов. Полигонами выделены участки с погибшим лесным покровом: сверху вниз – 2013, 2017, 2016 годы.



2015

2016

2018

Рисунок 36 – Территория погибших в 2013 году лесов на снимках 2015-2018 годов

На рисунке 36 можно видеть, что даже в 2018 году на анализируемой территории присутствовали по крайней мере стволы погибших деревьев. И только в 2020 году (рисунок 35) на зимнем снимке участок выглядит как безлесный. На территориях, где гибель лесного покрова датирована 2016 и 2017 годами, до настоящего времени имеется растительность, высотой превышающая глубину снежного покрова.

Таким образом, гибель лесного покрова в результате повреждения сибирским шелкопрядом приводит к постепенному изменению подстилающей поверхности в течение нескольких лет и не приводит к одномоментному изменению величины стока.

5.3 Динамика климатических параметров на гаях в Эвенкии

Для выделения участков гарей использовался продукт MODIS MCD64A1. Ниже приведен листинг программного кода выбора и визуализации гарей, результат работы кода – на рисунке 37.

Листинг 3 – Визуализация данных продукта MCD64A1

```
//Fires
var dataset = ee.ImageCollection('MODIS/006/MCD64A1')
    .filter(ee.Filter.date('2010-04-01', '2020-10-31'));
var burnedArea = dataset.select('BurnDate');
var burnedAreaVis = {
  min: 160.0,
  max: 210.0,
  palette: ['4e0400', '951003', 'c61503', 'ff1901'],
};
Map.setCenter(97.0, 64.5, 6);
Map.addLayer(burnedArea, burnedAreaVis, 'Burned Area');
```

Далее были выделены гари только 2018-2019 годов, которые использовались как маски для климатических и гидрологических параметров. Участки гарей небольшие; и поскольку динамику климатико-гидрологических параметров для гораздо больших участков погибших от сибирского шелкопряда лесов выделить не удалось, в работе ограничились только температурой воздуха.



Рисунок 37 – Территория гарей на севере Красноярского края в 2018-2019 годах

Получены значения температуры воздуха с 2016 по 2020 год с апреля по октябрь месяц в каждом году на территории гарей 2018 года (рисунок 38).

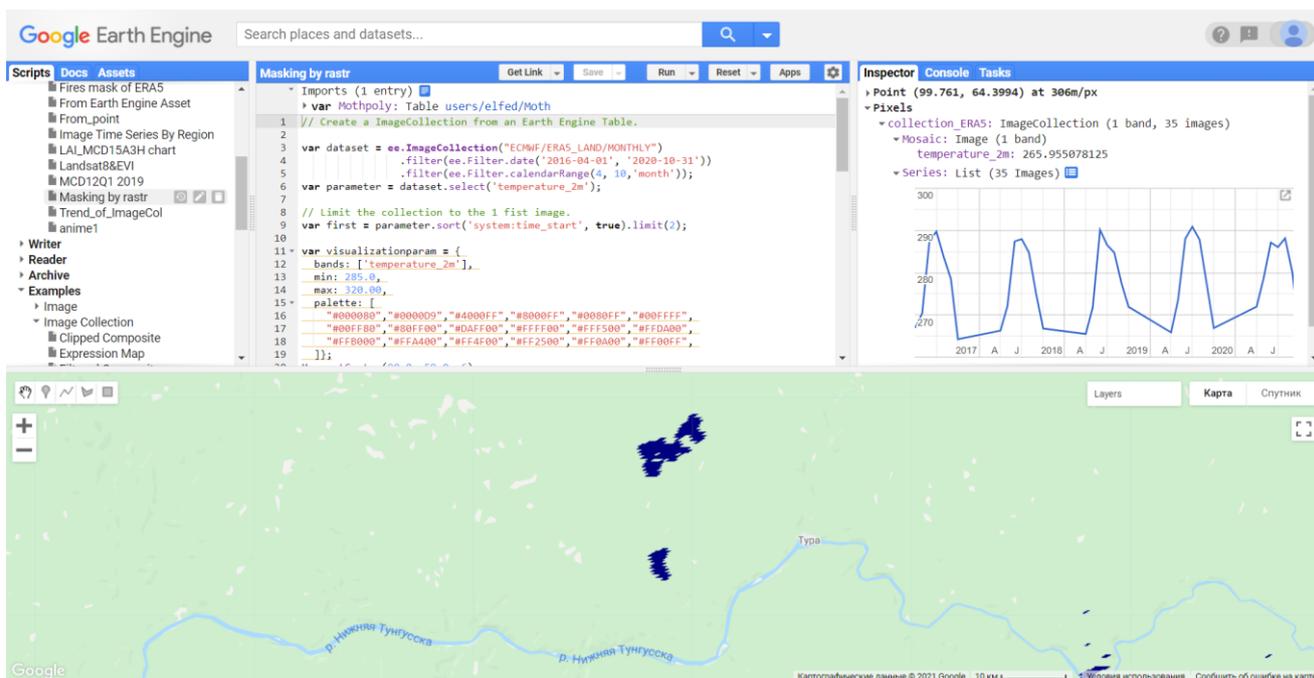


Рисунок 38 – Рабочее окно EarthEngine с растром температуры, маскированным территориями гарей с 2016 по 2020 год в районе Туры

Далее данные графика могут быть получены в формате CSV для дальнейшей обработки.

Таким образом, разработаны программные коды получения значений отдельных параметров из БД ERA5-Land для отдельных пикселей, векторных полигональных слоев и растровых маскированных объектов. Возможно получение непосредственных значений, а также значений функций, рассчитанных по пространственным и временным наборам параметров из БД ERA5-Land и космическим снимкам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ динамики параметров гидрологического режима речных бассейнов в связи с изменением растительного покрова, используя средства работы с климатическими данными и данными дистанционного зондирования в облачной среде Google Earth Engine.

Решены задачи:

- определены факторы, рассматриваемые в литературных источниках как влияющие на гидрологический режим территорий;
- получены данные в облачной среде из базы данных по климату ERA5-Land для территорий со значительным изменением растительности;
- разработаны программы пространственного анализа данных;
- проведен анализ полученных параметров для трех бассейнов рек центральной части Красноярского края и для территорий с гибелью лесного покрова в результате повреждения насекомыми и пожарами.

В качестве инструментария использовалась облачная среда EarthEngine. Написаны программы на языке Java Script для решения задачи анализа данных ERA5-Land на водосборных территориях и участках лесных гарей.

Написаны программные модули:

- вычисления месячных значений осадков, испарения и стока;
- построение коэффициентов линейного тренда и получение результата в виде растра;
- извлечения данных по маске растрового слоя.

Кроме того, использовался модуль для просмотра космических снимков с приборов Landsat-5, Landsat-7, Landsat-8, Sentinel-2 на анализируемые территории.

Облачная среда EarthEngine в Google стала удобным и эффективным средством для анализа климатических, гидрологических данных, космических снимков для проведения совместного пространственного анализа в области исследования влияния изменения гидрологического режима бассейнов в связи с изменениями растительного их покрова.

Анализ динамики климатических и гидрологических параметров из базы данных ERA5-Land на исследуемых территориях показал, что в бассейнах рек Качи, Бузима и Малого Кемчуга наметился тренд увеличения апрельских температур и роста осадков в июне. Тенденция уменьшения стока в летние месяцы сопровождается ростом испарения, что может быть вызвано ростом температуры воздуха. Время наступления максимального стока зависит от растительности бассейна: в более лесном бассейне Малого Кемчуга максимальный сток в мае, в бассейне реки Бузим с преобладанием сельскохозяйственных территорий – в апреле, а в бассейне реки Кача сток распределен примерно поровну в эти два месяца.

В бассейнах рек Каса и Сыма, в которых произошла гибель лесного покрова в 2013, 2016 и 2017 годах, изменения стока выявить не удалось. Визуальный анализ снимков Landsat-8 и Sentinel-2 на эти территории

показывает постепенное изменение растительного покрова от леса к открытым пространствам. Также изменение стока не удалось выявить и для участков, где лес погиб в результате пожаров, на севере Красноярского края, в районе поселка Тура.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Зайков Б.Д. Очерки гидрологических исследований в России – Л.Ж Гидрометеиздат, 1973. – 328 с.
- 2 Антипов А.Н., Федоров В.Н. Ландшафтно-гидрологическая организация территории. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 254 с.
- 3 ArcGIS Online. Mapping and analysis: location intelligence for everyone [Электронный ресурс] : – Режим доступа: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-online/overview>
- 4 NextGIS [Электронный ресурс] : – Режим доступа: <https://nextgis.ru/>
- 5 Welcome to Google Earth Engine [Электронный ресурс] : – Режим доступа: <https://developers.google.com/earth-engine>
- 6 Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Pyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone//Remote Sensing of Environment. – 2017, vol. 202. – P. 18–27.
- 7 Корытный Л. М. Бассейновая концепция: от гидрологии к природопользованию//География и природные ресурсы, 2017. № 2. – с. 5–16.
- 8 Гарцман Б.И., Шекман Е.А., Ли К.Т. Порядковая классификация речных водоразделов на основе обработки цифровых моделей рельефа// География и природный ресурсы, 2016, №4. – С. 164–173.
- 9 Никитина А.Д., Князева С.В., Гаврилюк Е.А., Тихонова Е.В., Эйдлина С.П., Королева Н.В. Картографирование динамики растительного покрова территории национального парка «Куршская коса» по материалам космической съемки ALOS и SENTINEL-2// Вопросы лесной науки, Выпуск «Аэрокосмические методы и ГИС-технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии» Т 2 (3). – 2019. – 21 с.
- 10 Позаченюк Е.А., Ергина Е.И., Олиферов А.Н., Михайлов В.А., Власова А.Н., Кудрянь Е.А., Пенно М.В., Калинчук И.В. Анализ факторов формирования водных ресурсов р. Салгир в условиях изменяющегося климата// Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Серия «География». Том 27 (66), № 2. 2014 г. – С. 118–138.
- 11 Терехин Э.А. Геоинформационное картографирование изменений в лесах на основе спутниковых снимков (на примере Белгородской области)//География и природные ресурсы. 2016 № 4. – С. 174–181.
- 12 Рулев А. С., Кошелева О. Ю., Шинкаренко С. С. Оценка лесистости агроландшафтов юга Приволжской возвышенности по данным NDVI // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса : наука и высшее профессиональное образование № 4 (44), 2016. – С. 1–7.
- 13 Терехин Э.А., Чендев Ю.Г. Анализ пространственно-временных изменений лесистости на юге лесостепи Среднерусской возвышенности по спутниковым данным//Лесоведение, 2019, №4. – С. 257–265.
- 14 Прысов Д. А., Буренина Т. А., Мусохранова А. В., Кошкаров А. Д. Трансформация стока рек криолитозоны средней сибери при различных

сценариях изменения лесистости и климата//Сибирский лесной журнал, 2021. - №1. – С. 30-44.

15 Ding J., Zhao W., Daryanto S., Wang L., Fan H., Feng Q., Wang Y. The spatial distribution and temporal variation of desert riparian forests and their influencing factors in the downstream Heihe River basin, China//Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 2017. – p. 2405–2419. www.hydrol-earth-syst-sci.net/21/2405/2017/ doi:10.5194/hess-21-2405-2017.

16 Wang H. , Sun F. , Xia J. , Liu W. Impact of LUCC on streamflow based on the SWAT model over the Wei River basin on the Loess Plateau in China//Hydrol. Earth Syst. Sci., 2017. № 2. – p. 1929–1945. www.hydrol-earth-syst-sci.net/21/1929/2017/, doi:10.5194/hess-21-1929-2017.

17 Liu W., Wei X., Li Q., Fan H., Duan H., Wu J., Giles-Hansen K., Zhang H. Hydrological recovery in two large forested watersheds of southeastern China: the importance of watershed properties in determining hydrological responses to reforestation//Hydrol. Earth Syst. Sci., 2016. – № 20. – p. 4747–4756, www.hydrol-earth-syst-sci.net/20/4747/2016/. doi:10.5194/hess-20-4747-2016.

18 Guimberteau M., Ciais P., Ducharne A. et.al. Impacts of future deforestation and climate change on the hydrology of the Amazon Basin: a multi-model analysis with a new set of land-cover change scenarios//Hydrol. Earth Syst. Sci., 2017, 21. – p. 1455–1475. www.hydrol-earth-syst-sci.net/21/1455/2017/. doi:10.5194/hess-21-1455-2017.

19 Ramírez B.H., Teuling A.J., Ganzeveld L., Hegger Z., Leemans R. Tropical Montane Cloud Forests: Hydrometeorological variability in three neighbouring catchments with different forest cover//Journal of Hydrology, 2017. – №552. – P. 151–167.

20 Рельеф MERIT Hydro (MERIT Hydrologically Adjusted Elevations (версия 1.0 от 17 мая 2019 г.) [Электронный ресурс] : – Режим доступа: http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/MERIT_Hydro/.

21 Dallaire C. O., Lehner B., Sayre R., Thieme M. A multidisciplinary framework to derive global river reach classifications at high spatial resolution//Environmental Research Letters. 2019. doi: 10.1088/1748-9326/aad8e9

22 Yamazaki D., Ikeshima D., Sosa J., Bates P.D., Allen G.H., Pavelsky T.M. MERIT Hydro: A High-Resolution Global Hydrography Map Based on Latest Topography Dataset //Water Resources Research, 2019. Vol. 55, Iss. 6. – P. 5053-5073. <https://doi.org/10.1029/2019WR024873>.

23 Linke S., Lehner B., Dallaire C. O., Ariwi J., Gril, G., Anand M., Beames P., Burchard-Levine V., Maxwell S., Moidu H., Tan F., Thieme M. Global hydro-environmental sub-basin and river reach characteristics at high spatial resolution//Scientific Data. 2019. Vol. 6., 283. doi: 10.1038/s41597-019-0300-6.

24 Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.G., Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas// International Journal of Climatology, 2005. Vol. 25, №15. – P. 1965-1978.

25 Баргалева С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2011. Т.8. № 4. – С.285-302.

26 ИКИ РАН. Отдел "Технологий спутникового мониторинга" [Электронный ресурс] : – Режим доступа: <http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=317>.

27 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500 m SIN Grid [Электронный ресурс] : - Режим доступа: <https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006/>.

28 Zandler H., Senftl T., Vanselow K.A. Reanalysis datasets outperform other gridded climate products in vegetation change analysis in peripheral conservation areas of Central Asia// Sci Rep, 2020. – Vol. 10, 22446. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79480-y>.

29 Gleixner S, Demissie T, Diro G.T. 2020. Did ERA5 Improve Temperature and Precipitation Reanalysis over East Africa?// Atmosphere, 2020. – Vol. 11(9):996.

30 Betts A.K., Chan D.Z., Desjardins R.L. Near-Surface Biases in ERA5 Over the Canadian Prairies// Front. Environ. Sci., 2019. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00129>.

31 Pesci M.H., Voges F., R  ther N., Förster K. A first look at ERA5 for physically based water balance modelling of the Devoll Catchment, Albania //EGU2020-2405 <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-2405>, EGU General Assembly 2020.

32 Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change// Science 15 Nov 2013: Vol. 342, Issue 6160. – p. 850-853/. DOI: 10.1126/science.1244693

33 ArcGIS. Картографическая и аналитическая платформа [Электронный ресурс] : – Режим доступа: <https://www.esri-cis.ru/ru-ru/arcgis/about-arcgis/overview>.

34 QGIS. Свободная географическая информационная система с открытым кодом [Электронный ресурс] : – Режим доступа: <https://www.qgis.org/ru/site/>

35 Whitebox GAT [Электронный ресурс] : – Режим доступа: <https://whiteboxgeospatial.wordpress.com/>

36 Lindsay J., PhD Geography, Environment & Geomatics·University of Guelph [Электронный ресурс] : - Режим доступа: <https://www.uoguelph.ca/~hydrogeo/Whitebox/download.shtml>

37 Ghazaryan G. Analysis of temporal and spatial variation of forest. A case of study in northeastern Armenia// Magister Dissertation. Institute for Geoinformatics, University of Muenster, 2015.

38 SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales (HydroSHEDS)
[Электронный ресурс] : – Режим доступа: <http://www.hydrosheds.org/>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Слои в наборе данных ERA5-Land

Таблица 1 – Описание слоев данных набора ERA5-Land

Имя	Едини- цы измере- ния	Описание
dewpoint_temperature_2m	К	Temperature to which the air, at 2 metres above the surface of the Earth, would have to be cooled for saturation to occur. It is a measure of the humidity of the air. Combined with temperature and pressure, it can be used to calculate the relative humidity. 2m dew point temperature is calculated by interpolating between the lowest model level and the Earth's surface, taking account of the atmospheric conditions. Temperature measured in kelvin can be converted to degrees Celsius (°C) by subtracting 273.15.
temperature_2m	К	Temperature of air at 2m above the surface of land, sea or in-land waters. 2m temperature is calculated by interpolating between the lowest model level and the Earth's surface, taking account of the atmospheric conditions. Temperature measured in kelvin can be converted to degrees Celsius (°C) by subtracting 273.15.
skin_temperature	К	Temperature of the surface of the Earth. The skin temperature is the theoretical temperature that is required to satisfy the surface energy balance. It represents the temperature of the uppermost surface layer, which has no heat capacity and so can respond instantaneously to changes in surface fluxes. Skin temperature is calculated differently over land and sea. Temperature measured in kelvin can be converted to degrees Celsius (°C) by subtracting 273.15.
soil_temperature_level_1	К	Temperature of the soil in layer 1 (0 - 7 cm) of the ECMWF Integrated Forecasting System. The surface is at 0 cm. Soil temperature is set at the middle of each layer, and heat transfer is calculated at the interfaces between them. It is assumed that there is no heat transfer out of the bottom of the lowest layer. Temperature measured in kelvin can be converted to degrees Celsius (°C) by subtracting 273.15.
soil_temperature_level_2	К	Temperature of the soil in layer 2 (7-28 cm) of the ECMWF Integrated Forecasting System.
soil_temperature_level_3	К	Temperature of the soil in layer 3 (28-100 cm) of the ECMWF Integrated Forecasting System.
soil_temperature_level_4	К	Temperature of the soil in layer 4 (100-289 cm) of the ECMWF Integrated Forecasting System.
lake_bottom_temperature	К	Temperature of water at the bottom of inland water bodies (lakes, reservoirs, rivers) and coastal waters. ECMWF implemented a lake model in May 2015 to represent the water temperature and lake ice of all the world's major inland water bodies in the Integrated Forecasting System. The model keeps lake depth and surface area (or fractional cover) constant in time.

lake_ice_depth	m	The thickness of ice on inland water bodies (lakes, reservoirs and rivers) and coastal waters. The ECMWF Integrated Forecasting System (IFS) represents the formation and melting of ice on inland water bodies (lakes, reservoirs and rivers) and coastal water. A single ice layer is represented. This parameter is the thickness of that ice layer.
lake_ice_temperature	K	The temperature of the uppermost surface of ice on inland water bodies (lakes, reservoirs, rivers) and coastal waters. The ECMWF Integrated Forecasting System represents the formation and melting of ice on lakes. A single ice layer is represented. The temperature measured in kelvin can be converted to degrees Celsius (°C) by subtracting 273.15.
lake_mix_layer_depth	m	The thickness of the upper most layer of an inland water body (lake, reservoirs, and rivers) or coastal waters that is well mixed and has a near constant temperature with depth (uniform distribution of temperature). The ECMWF Integrated Forecasting System represents inland water bodies with two layers in the vertical, the mixed layer above and the thermocline below. Thermoclines upper boundary is located at the mixed layer bottom, and the lower boundary at the lake bottom. Mixing within the mixed layer can occur when the density of the surface (and near-surface) water is greater than that of the water below. Mixing can also occur through the action of wind on the surface of the lake.
lake_mix_layer_temperature	K	The temperature of the upper most layer of inland water bodies (lakes, reservoirs and rivers) or coastal waters) that is well mixed. The ECMWF Integrated Forecasting System represents inland water bodies with two layers in the vertical, the mixed layer above and the thermocline below. Thermoclines upper boundary is located at the mixed layer bottom, and the lower boundary at the lake bottom. Mixing within the mixed layer can occur when the density of the surface (and near-surface) water is greater than that of the water below. Mixing can also occur through the action of wind on the surface of the lake. Temperature measured in kelvin can be converted to degrees Celsius (°C) by subtracting 273.15.
lake_shape_factor		This parameter describes the way that temperature changes with depth in the thermocline layer of inland water bodies (lakes, reservoirs and rivers) and coastal waters. It is used to calculate the lake bottom temperature and other lake-related parameters. The ECMWF Integrated Forecasting System represents inland and coastal water bodies with two layers in the vertical, the mixed layer above and the thermocline below where temperature changes with depth.
lake_total_layer_temperature	K	The mean temperature of total water column in inland water bodies (lakes, reservoirs and rivers) and coastal waters. The ECMWF Integrated Forecasting System represents inland water bodies with two layers in the vertical, the mixed layer above and the thermocline below where temperature changes with depth. This parameter is the

		mean over the two layers. Temperature measured in kelvin can be converted to degrees Celsius (°C) by subtracting 273.15.
snow_albedo		It is defined as the fraction of solar (shortwave) radiation reflected by the snow, across the solar spectrum, for both direct and diffuse radiation. It is a measure of the reflectivity of the snow covered grid cells. Values vary between 0 and 1. Typically, snow and ice have high reflectivity with albedo values of 0.8 and above.
snow_cover	%	It represents the fraction (0-1) of the cell / grid-box occupied by snow (similar to the cloud cover fields of ERA5).
snow_density	kg/m ³	Mass of snow per cubic metre in the snow layer. The ECMWF Integrated Forecast System (IFS) model represents snow as a single additional layer over the uppermost soil level. The snow may cover all or part of the grid box.
snow_depth	m	Instantaneous grid-box average of the snow thickness on the ground (excluding snow on canopy).
snow_depth_water_equivalent	m of water equivalent	Depth of snow from the snow-covered area of a grid box. Its units are metres of water equivalent, so it is the depth the water would have if the snow melted and was spread evenly over the whole grid box. The ECMWF Integrated Forecast System represents snow as a single additional layer over the uppermost soil level. The snow may cover all or part of the grid box.
snowfall	m of water equivalent	Accumulated total snow that has fallen to the Earth's surface. It consists of snow due to the large-scale atmospheric flow (horizontal scales greater than around a few hundred metres) and convection where smaller scale areas (around 5km to a few hundred kilometres) of warm air rise. If snow has melted during the period over which this variable was accumulated, then it will be higher than the snow depth. This variable is the total amount of water accumulated from the beginning of the forecast time to the end of the forecast step. The units given measure the depth the water would have if the snow melted and was spread evenly over the grid box. Care should be taken when comparing model variables with observations, because observations are often local to a particular point in space and time, rather than representing averages over a model grid box and model time step.
snowmelt	m of water equivalent	Melting of snow averaged over the grid box (to find melt over snow, divide by snow fraction). This variable is accumulated from the beginning of the forecast time to the end of the forecast step.
temperature_of_snow_layer	K	This variable gives the temperature of the snow layer from the ground to the snow-air interface. The ECMWF Integrated Forecast System (IFS) model represents snow as a single additional layer over the uppermost soil level. The snow may cover all or part of the grid box. Temperature measured in kelvin can be converted to degrees Celsius (°C) by subtracting 273.15.
skin_reservoir_content	m of water	Amount of water in the vegetation canopy and/or in a thin layer on the soil. It represents the amount of rain intercepted by foliage, and

	equivalent	water from dew. The maximum amount of 'skin reservoir content' a grid box can hold depends on the type of vegetation, and may be zero. Water leaves the 'skin reservoir' by evaporation.
volumetric_soil_water_layer_1	m^3/m^3	Volume of water in soil layer 1 (0 - 7 cm) of the ECMWF Integrated Forecasting System. The surface is at 0 cm. The volumetric soil water is associated with the soil texture (or classification), soil depth, and the underlying groundwater level.
volumetric_soil_water_layer_2	m^3/m^3	Volume of water in soil layer 2 (7 -28 cm) of the ECMWF Integrated Forecasting System.
volumetric_soil_water_layer_3	m^3/m^3	Volume of water in soil layer 3 (28-100 cm) of the ECMWF Integrated Forecasting System.
volumetric_soil_water_layer_4	m^3/m^3	Volume of water in soil layer 4 (100-289 cm) of the ECMWF Integrated Forecasting System.
forecast_albedo		Is a measure of the reflectivity of the Earth's surface. It is the fraction of solar (shortwave) radiation reflected by Earth's surface, across the solar spectrum, for both direct and diffuse radiation. Values are between 0 and 1. Typically, snow and ice have high reflectivity with albedo values of 0.8 and above, land has intermediate values between about 0.1 and 0.4 and the ocean has low values of 0.1 or less. Radiation from the Sun (solar, or shortwave, radiation) is partly reflected back to space by clouds and particles in the atmosphere (aerosols) and some of it is absorbed. The rest is incident on the Earth's surface, where some of it is reflected. The portion that is reflected by the Earth's surface depends on the albedo. In the ECMWF Integrated Forecasting System (IFS), a climatological background albedo (observed values averaged over a period of several years) is used, modified by the model over water, ice and snow. Albedo is often shown as a percentage (%).
surface_latent_heat_flux	J/m^2	Exchange of latent heat with the surface through turbulent diffusion. This variables is accumulated from the beginning of the forecast time to the end of the forecast step. By model convention, downward fluxes are positive.
surface_net_solar_radiation	J/m^2	Amount of solar radiation (also known as shortwave radiation) reaching the surface of the Earth (both direct and diffuse) minus the amount reflected by the Earth's surface (which is governed by the albedo). Radiation from the Sun (solar, or shortwave, radiation) is partly reflected back to space by clouds and particles in the atmosphere (aerosols) and some of it is absorbed. The rest is incident on the Earth's surface, where some of it is reflected. The difference between downward and reflected solar radiation is the surface net solar radiation. This variable is accumulated from the beginning of the forecast time to the end of the forecast step. The units are joules per square metre ($J m^{-2}$). To convert to watts per square metre ($W m^{-2}$), the accumulated values should be divided by the accumulation period expressed in seconds. The ECMWF convention for vertical fluxes is positive downwards.

surface_net_thermal_radiation	J/m^2	Net thermal radiation at the surface. Accumulated field from the beginning of the forecast time to the end of the forecast step. By model convention downward fluxes are positive.
surface_sensible_heat_flux	J/m^2	Transfer of heat between the Earth's surface and the atmosphere through the effects of turbulent air motion (but excluding any heat transfer resulting from condensation or evaporation). The magnitude of the sensible heat flux is governed by the difference in temperature between the surface and the overlying atmosphere, wind speed and the surface roughness. For example, cold air overlying a warm surface would produce a sensible heat flux from the land (or ocean) into the atmosphere. This is a single level variable and it is accumulated from the beginning of the forecast time to the end of the forecast step. The units are joules per square metre ($J m^{-2}$). To convert to watts per square metre ($W m^{-2}$), the accumulated values should be divided by the accumulation period expressed in seconds. The ECMWF convention for vertical fluxes is positive downwards.
surface_solar_radiation_downwards	J/m^2	Amount of solar radiation (also known as shortwave radiation) reaching the surface of the Earth. This variable comprises both direct and diffuse solar radiation. Radiation from the Sun (solar, or shortwave, radiation) is partly reflected back to space by clouds and particles in the atmosphere (aerosols) and some of it is absorbed. The rest is incident on the Earth's surface (represented by this variable). To a reasonably good approximation, this variable is the model equivalent of what would be measured by a pyranometer (an instrument used for measuring solar radiation) at the surface. However, care should be taken when comparing model variables with observations, because observations are often local to a particular point in space and time, rather than representing averages over a model grid box and model time step. This variable is accumulated from the beginning of the forecast time to the end of the forecast step. The units are joules per square metre ($J m^{-2}$). To convert to watts per square metre ($W m^{-2}$), the accumulated values should be divided by the accumulation period expressed in seconds. The ECMWF convention for vertical fluxes is positive downwards.
surface_thermal_radiation_downwards	J/m^2	Amount of thermal (also known as longwave or terrestrial) radiation emitted by the atmosphere and clouds that reaches the Earth's surface. The surface of the Earth emits thermal radiation, some of which is absorbed by the atmosphere and clouds. The atmosphere and clouds likewise emit thermal radiation in all directions, some of which reaches the surface (represented by this variable). This variable is accumulated from the beginning of the forecast time to the end of the forecast step. The units are joules per square metre ($J m^{-2}$). To convert to watts per square metre ($W m^{-2}$), the accumulated values should be divided by the accumulation period expressed in seconds. The ECMWF convention for vertical fluxes is positive downwards.

evaporation_from_bare_soil	m of water equivalent	The amount of evaporation from bare soil at the top of the land surface. This variable is accumulated from the beginning of the forecast time to the end of the forecast step.
evaporation_from_open_water_surfaces_excluding_oceans	m of water equivalent	Amount of evaporation from surface water storage like lakes and inundated areas but excluding oceans. This variable is accumulated from the beginning of the forecast time to the end of the forecast step.
evaporation_from_the_top_of_canopy	m of water equivalent	The amount of evaporation from the canopy interception reservoir at the top of the canopy. This variable is accumulated from the beginning of the forecast time to the end of the forecast step.
evaporation_from_vegetation_transpiration	m of water equivalent	Amount of evaporation from vegetation transpiration. This has the same meaning as root extraction i.e. the amount of water extracted from the different soil layers. This variable is accumulated from the beginning of the forecast time to the end of the forecast step.
potential_evaporation	m	Potential evaporation (pev) in the current ECMWF model is computed, by making a second call to the surface energy balance routine with the vegetation variables set to "crops/mixed farming" and assuming no stress from soil moisture. In other words, evaporation is computed for agricultural land as if it is well watered and assuming that the atmosphere is not affected by this artificial surface condition. The latter may not always be realistic. Although pev is meant to provide an estimate of irrigation requirements, the method can give unrealistic results in arid conditions due to too strong evaporation forced by dry air. This variable is accumulated from the beginning of the forecast time to the end of the forecast step.
runoff	m	Some water from rainfall, melting snow, or deep in the soil, stays stored in the soil. Otherwise, the water drains away, either over the surface (surface runoff), or under the ground (sub-surface runoff) and the sum of these two is simply called 'runoff'. This variable is the total amount of water accumulated from the beginning of the forecast time to the end of the forecast step. The units of runoff are depth in metres. This is the depth the water would have if it were spread evenly over the grid box. Care should be taken when comparing model variables with observations, because observations are often local to a particular point rather than averaged over a grid square area. Observations are also often taken in different units, such as mm/day, rather than the accumulated metres produced here. Runoff is a measure of the availability of water in the soil, and can, for example, be used as an indicator of drought or flood. More information about how runoff is calculated is given in the IFS Physical Processes documentation.
snow_evaporation	m of water	Evaporation from snow averaged over the grid box (to find flux over snow, divide by snow fraction). This variable is accumulated from the beginning of the forecast time to the end of the forecast step.

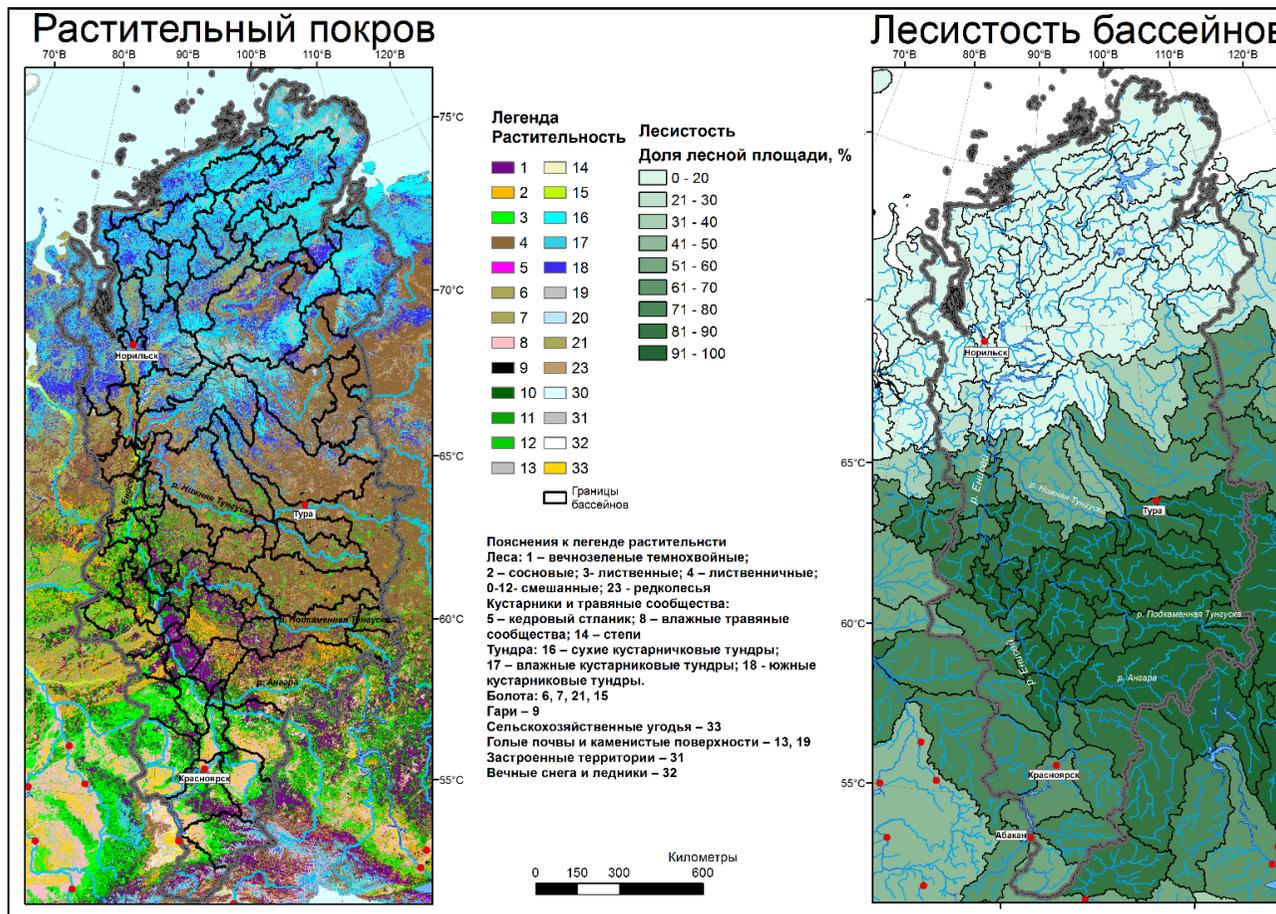
	equivalent	
sub_surface_runoff	m	Some water from rainfall, melting snow, or deep in the soil, stays stored in the soil. Otherwise, the water drains away, either over the surface (surface runoff), or under the ground (sub-surface runoff) and the sum of these two is simply called 'runoff'. This variable is accumulated from the beginning of the forecast time to the end of the forecast step. The units of runoff are depth in metres. This is the depth the water would have if it were spread evenly over the grid box. Care should be taken when comparing model variables with observations, because observations are often local to a particular point rather than averaged over a grid square area. Observations are also often taken in different units, such as mm/day, rather than the accumulated metres produced here. Runoff is a measure of the availability of water in the soil, and can, for example, be used as an indicator of drought or flood. More information about how runoff is calculated is given in the IFS Physical Processes documentation.
surface_runoff	m	Some water from rainfall, melting snow, or deep in the soil, stays stored in the soil. Otherwise, the water drains away, either over the surface (surface runoff), or under the ground (sub-surface runoff) and the sum of these two is simply called 'runoff'. This variable is the total amount of water accumulated from the beginning of the forecast time to the end of the forecast step. The units of runoff are depth in metres. This is the depth the water would have if it were spread evenly over the grid box. Care should be taken when comparing model variables with observations, because observations are often local to a particular point rather than averaged over a grid square area. Observations are also often taken in different units, such as mm/day, rather than the accumulated metres produced here. Runoff is a measure of the availability of water in the soil, and can, for example, be used as an indicator of drought or flood. More information about how runoff is calculated is given in the IFS Physical Processes documentation.
total_evaporation	m of water equivalent	Accumulated amount of water that has evaporated from the Earth's surface, including a simplified representation of transpiration (from vegetation), into vapour in the air above. This variable is accumulated from the beginning of the forecast to the end of the forecast step. The ECMWF Integrated Forecasting System convention is that downward fluxes are positive. Therefore, negative values indicate evaporation and positive values indicate condensation.
u_component_of_wind_10m	m/s	Eastward component of the 10m wind. It is the horizontal speed of air moving towards the east, at a height of ten metres above the surface of the Earth, in metres per second. Care should be taken when comparing this variable with observations, because wind observations vary on small space and time scales and are affected by the local terrain, vegetation and buildings that are represented only on

		average in the ECMWF Integrated Forecasting System. This variable can be combined with the V component of 10m wind to give the speed and direction of the horizontal 10m wind.
v_component_of_wind_10m	m/s	Northward component of the 10m wind. It is the horizontal speed of air moving towards the north, at a height of ten metres above the surface of the Earth, in metres per second. Care should be taken when comparing this variable with observations, because wind observations vary on small space and time scales and are affected by the local terrain, vegetation and buildings that are represented only on average in the ECMWF Integrated Forecasting System. This variable can be combined with the U component of 10m wind to give the speed and direction of the horizontal 10m wind.
surface_pressure	Pa	Pressure (force per unit area) of the atmosphere on the surface of land, sea and in-land water. It is a measure of the weight of all the air in a column vertically above the area of the Earth's surface represented at a fixed point. Surface pressure is often used in combination with temperature to calculate air density. The strong variation of pressure with altitude makes it difficult to see the low and high pressure systems over mountainous areas, so mean sea level pressure, rather than surface pressure, is normally used for this purpose. The units of this variable are Pascals (Pa). Surface pressure is often measured in hPa and sometimes is presented in the old units of millibars, mb (1 hPa = 1 mb = 100 Pa).
total_precipitation	m	Accumulated liquid and frozen water, including rain and snow, that falls to the Earth's surface. It is the sum of large-scale precipitation (that precipitation which is generated by large-scale weather patterns, such as troughs and cold fronts) and convective precipitation (generated by convection which occurs when air at lower levels in the atmosphere is warmer and less dense than the air above, so it rises). Precipitation variables do not include fog, dew or the precipitation that evaporates in the atmosphere before it lands at the surface of the Earth. This variable is accumulated from the beginning of the forecast time to the end of the forecast step. The units of precipitation are depth in metres. It is the depth the water would have if it were spread evenly over the grid box. Care should be taken when comparing model variables with observations, because observations are often local to a particular point in space and time, rather than representing averages over a model grid box and model time step.
leaf_area_index_high_vegetation	m ² /m ²	One-half of the total green leaf area per unit horizontal ground surface area for high vegetation type.
leaf_area_index_low_vegetation	m ² /m ²	One-half of the total green leaf area per unit horizontal ground surface area for low vegetation type.

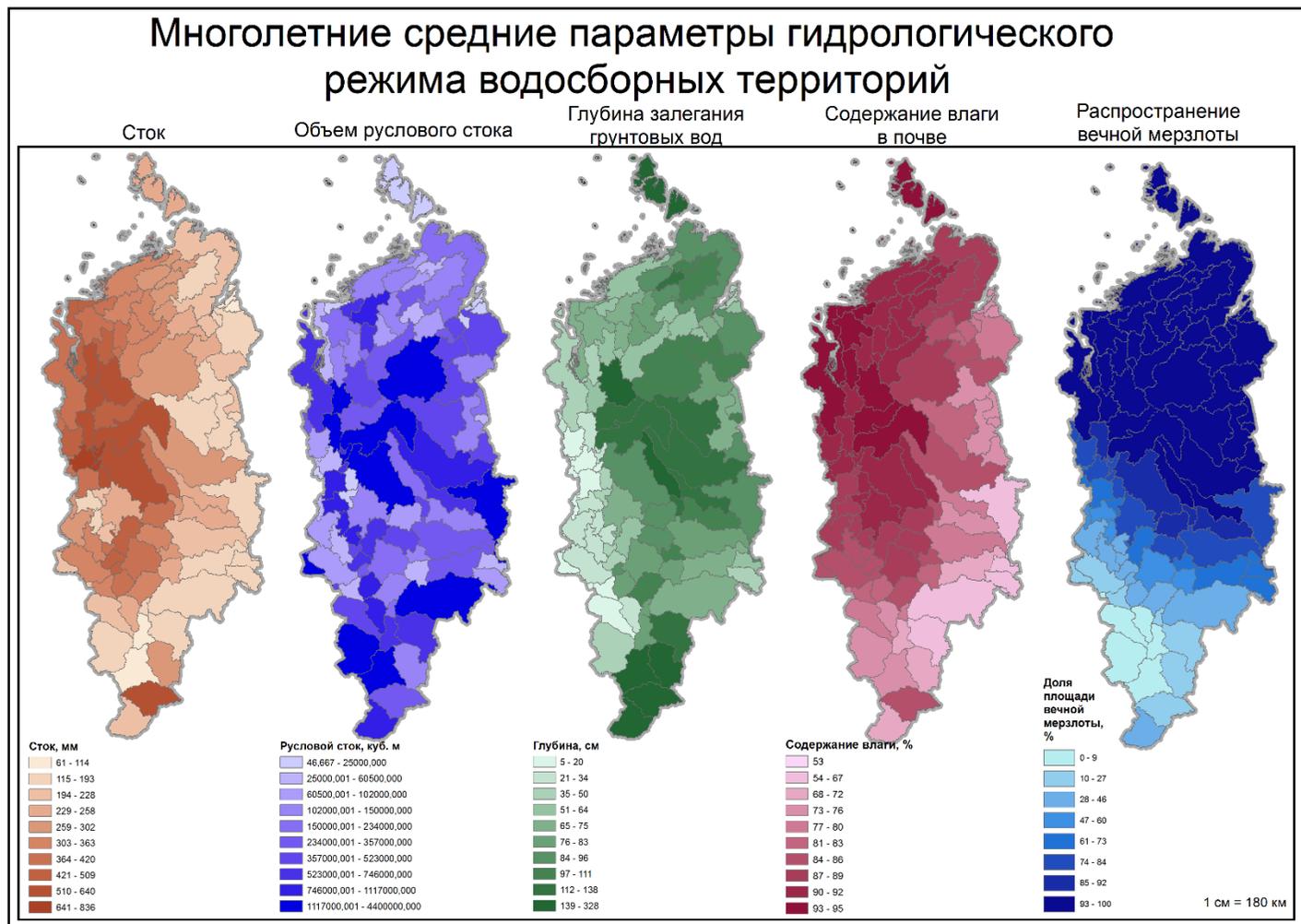
ПРИЛОЖЕНИЕ Б

КАРТЫ ЛАНДШАФТНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БАССЕЙНОВ РЕК КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

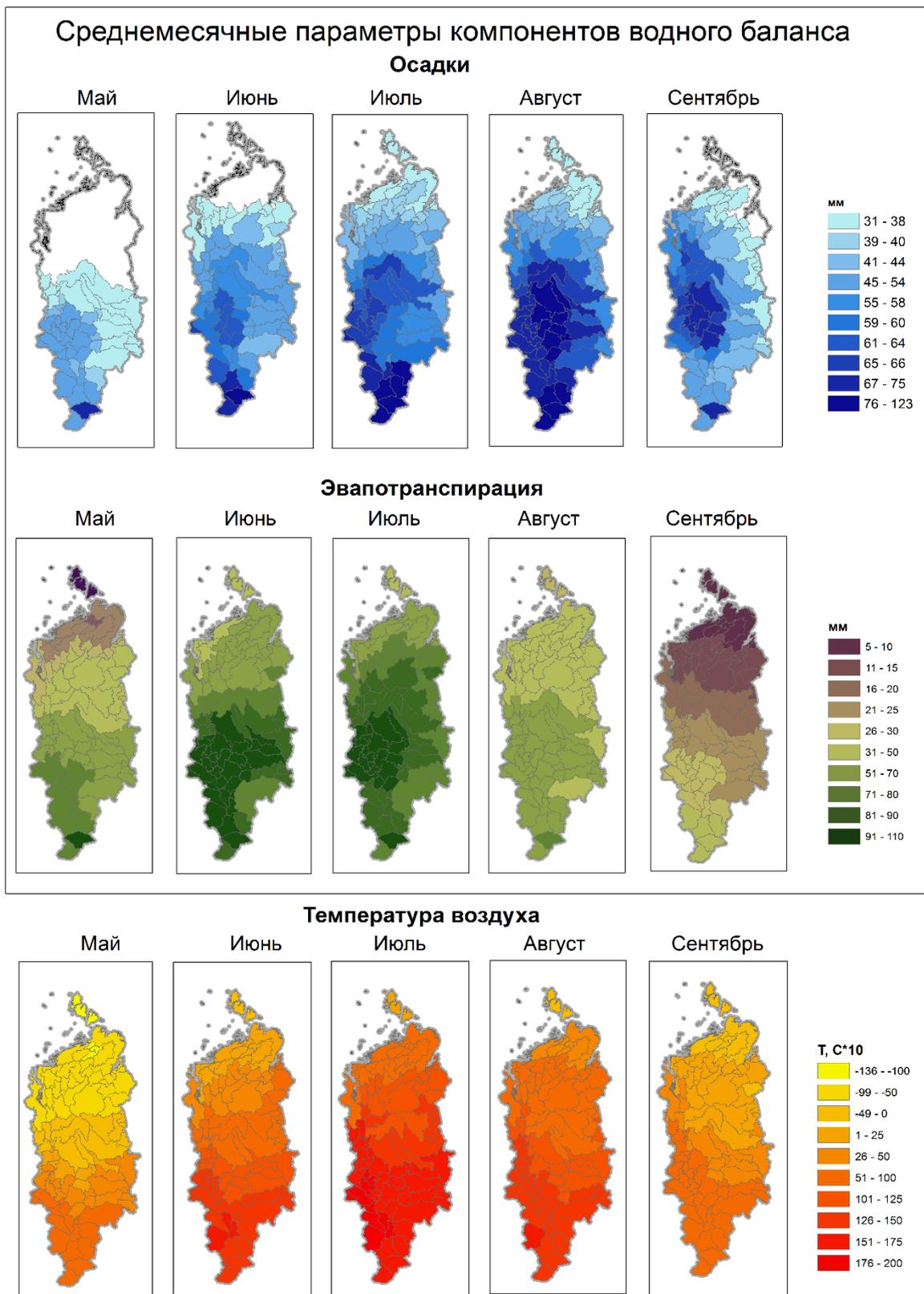
Б.1 Карты растительности и лесистости



Б.2 Средние значения гидрологических характеристик



Б.3 Среднемесячные параметры компонентов водного баланса



ПРИЛОЖЕНИЕ В
Данные о динамике лесной площади бассейнов с 2000 года, м²

Площадь погибших или вырубленных лесов (убыль) по годам																		
VALUE_0	VALUE_1	VALUE_2	VALUE_3	VALUE_4	VALUE_5	VALUE_6	VALUE_7	VALUE_8	VALUE_9	VALUE_10	VALUE_11	VALUE_12	VALUE_13	VALUE_14	VALUE_15	VALUE_16	VALUE_17	VALUE_18
2553509662.73	1104885.94	968361.22	830313.92	2592447.12	1126709.60	3508025.55	2866004.09	4618494.29	1299268.72	4520034.08	1753505.25	5284877.03	2388421.33	3579079.31	2981212.69	3118244.93	3466915.88	4202829.80
1240434180.26	292335.46	143122.57	209608.59	571982.75	194890.31	719673.07	376077.39	320756.97	153273.11	289797.83	289290.30	321264.49	918623.59	1409402.05	936387.03	936387.03	1792584.82	2229057.90
2416592623.28	1921496.63	1907285.88	360851.59	2359999.83	1724068.69	1565720.32	2280825.64	4420051.29	3611561.03	3155801.92	2559457.88	6133969.44	3775999.72	7969694.04	3087793.32	2456937.45	5807629.68	15008583.85
Площадь новых лесов, 2000 и 2019 годы																		
VALUE_0	VALUE_1																	
1242308476.90	10221590.65	Кача																
2407770791.67	78945800.68	Кемчуг																
2570141317.43	33593709.37	Бузим																

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Листинги программного кода в облачной среде EarthEngine для извлечения и визуализации данных

Г.1. Листинг программного кода построения графика среднего значения параметра по бассейну за выбранные один или два месяца (выборка по векторному объекту)

```
// Create an ImageCollection from an Earth Engine Table.

var dataset = ee.ImageCollection("ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY")
    .filter(ee.Filter.date('1981-01-01', '2020-12-31'))
    .filter(ee.Filter.calendarRange(12, 12, 'month'));
//select parameter for obtaining
var parameter = dataset.select('potential_evaporation');

// Limit the collection to the 1 last image.
var last = parameter.sort('system:time_start', false).limit(2);
// Limit the collection to the 1 fist image.
var fist = parameter.sort('system:time_start', true).limit(2);
Map.setCenter(93.0, 56.0, 5);
Map.addLayer(last, visualizationparam, "potential_evaporation");
Map.addLayer(fist, visualizationparam, "potential_evaporation");

// create function (*1000)
var mult1000 = function(image) {
  var mult = ee.Image(0).expression(
    'potential_evaporation * 1000', {
      potential_evaporation: image.select('potential_evaporation'),
    });
  return image.addBands(mult.rename('mult'));
};

// apply function over collection
var mergedmult = dataset.map(mult1000);

var visualizationparam = {
  bands: ['potential_evaporation'],
  min: -0.0050,
  max: 0.0,
  palette: [
    "#000080", "#0000D9", "#4000FF", "#8000FF", "#0080FF", "#00FFFF",
    "#00FF80", "#80FF00", "#DAFF00", "#FFFF00", "#FFF500", "#FFDA00",
    "#FFB000", "#FFA400", "#FF4F00", "#FF2500", "#FF0A00", "#FF00FF",
  ]};

var options = {
  title: 'mult',
  hAxis: {title: 'Date'},
  vAxis: {title: 'Value'},
  lineWidth: 1,
  series: {
    0: {color: 'FF0000'}, // NBR
    1: {color: '00FF00'}, // NDVI
    2: {color: '0000FF'}, // SWVI
  }
};

//print(Chart.image.series(parameter, Kacha, ee.Reducer.mean(),
30).setOptions(options));
```

```

//print(Chart.image.series(parameter, Buzim, ee.Reducer.mean(),
30).setOptions(options));
//print(Chart.image.series(parameter, Kemchug, ee.Reducer.mean(),
30).setOptions(options));

//Map.addLayer(dataset.median(), visParams);
// Display shape
/*Map.addLayer(Kacha, {color: 'red'}, 'Name');
Map.addLayer(Buzim, {color: 'green'}, 'Name');
Map.addLayer(Kemchug, {color: 'blue'}, 'Name');*/

var paramTimeSeries = ui.Chart.image.seriesByRegion({
  imageCollection: mergedmult,
//select region of interest
  regions: Kemchug,
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  band: 'mult',
  scale: 200,
  xProperty: 'system:time_start',
  seriesProperty: 'label'
});
paramTimeSeries.setChartType('ScatterChart');
paramTimeSeries.setOptions({
  title: 'mult',
  vAxis: {
    title: 'mult'
  },
  lineWidth: 1,
  pointSize: 4,
  series: {
    0: {color: 'FF0000'},
    1: {color: 'FF0000'},
    2: {color: 'FF0000'},
    3: {color: 'FF0000'}
  }
});

print(paramTimeSeries);

```

Г.2. Листинг программного кода вывода значений параметров в текстовый файл

```
var aoi = ee.Geometry.Point([93.2856, 56.5076]);
//Map.addLayer(Kacha, {color: 'red'}, 'Kacha');
Map.addLayer(Buzim, {color: 'green'}, 'Buzim');
//Map.addLayer(Kemchug, {color: 'blue'}, 'Kemchug');
// filter the image collection
var dataset = ee.ImageCollection("ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY")
                .filter(ee.Filter.date('2000-01-01', '2020-12-31'))
                .filter(ee.Filter.bounds(aoi));
// Limit the collection to the 1 last image.
var last = dataset.sort('system:time_start', false).limit(2);
var visualizationparam = {
  bands: ['temperature_2m'],
  min: 250.0,
  max: 270.0,
  palette: [
    "#000080", "#0000D9", "#4000FF", "#8000FF", "#0080FF", "#00FFFF",
    "#00FF80", "#80FF00", "#DAFF00", "#FFFF00", "#FFF500", "#FFDA00",
    "#FFB000", "#FFA400", "#FF4F00", "#FF2500", "#FF0A00", "#FF00FF",
  ]
};
Map.setCenter(93.0, 56.5, 9);
Map.addLayer(last, visualizationparam, "temperature_2m");

var parameters = dataset.select('temperature_2m',
'snow_depth_water_equivalent', 'runoff', 'total_evaporation',
'total_precipitation');
var data = parameters.getRegion(aoi, 306);

// transform the data to a feature collection which can be exported
// keys of the variables are in the first list
var keys = ee.List(data.get(0));

// make a feature collection from all the values from row 1 till end
var featureCollection =
ee.FeatureCollection(data.slice(1).map(function(singleData) {
  singleData = ee.List(singleData);
  var dict = ee.Dictionary.fromLists(keys, singleData);
  var point = ee.Geometry.Point([dict.get('longitude'), dict.get('latitude')]);
  return ee.Feature(point, dict);
})));

var featureCollection = parameters.map(function(image) {
  var data = image.reduceRegions(aoi, 'mean', 306).map(function(feats) {
    return ee.Feature(feats).set('time', image.get('system:time_start'), 'id',
image.get('system:index'),
    'latitude', feats.geometry().coordinates().get(1), 'longitude',
feats.geometry().coordinates().get(0));
  });
  return data;
}).flatten();

print(featureCollection);
Map.addLayer(featureCollection, {color: 'green'});

Export.table.toDrive(featureCollection, 'exportAsCSV', 'GEE', 'CSVexport', 'CSV');
```

Г.3. Листинг программного кода выбора данных маскированием с помощью растра

```
// Create an ImageCollection from an Earth Engine Table.
var dataset = ee.ImageCollection("ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY")
    .filter(ee.Filter.date('2016-04-01', '2020-10-31'))
    .filter(ee.Filter.calendarRange(4, 10, 'month'));
var parameter = dataset.select('temperature_2m');
// Limit the collection to the 1 first image.
var first = parameter.sort('system:time_start', true).limit(2);
var visualizationparam = {
  bands: ['temperature_2m'],
  min: 270.0,
  max: 320.00,
  palette: [
    "#000080", "#0000D9", "#4000FF", "#8000FF", "#0080FF", "#00FFFF",
    "#00FF80", "#80FF00", "#DAFF00", "#FFFF00", "#FFF500", "#FFDA00",
    "#FFB000", "#FFA400", "#FF4F00", "#FF2500", "#FF0A00", "#FF00FF",
  ]
};
Map.setCenter(90.0, 59.0, 6);
Map.addLayer(first, visualizationparam, "temperature_2m");
//Masking ERA5 data using Fires data
var fires_set = ee.ImageCollection('MODIS/006/MCD64A1')
    .filter(ee.Filter.date('2018-07-01', '2018-08-01'));
var burnedArea = fires_set.select('BurnDate');
var burnedAreaVis = {
  min: 30.0,
  max: 341.0,
  palette: ['4e0400', '951003', 'c61503', 'ff1901'],
};
var burnMedian = burnedArea.reduce(ee.Reducer.median());
Map.addLayer(burnMedian);
var collection_ERA5 = parameter.map(function(img) {
  return img.updateMask(burnMedian);
});
Map.addLayer(collection_ERA5, burnedAreaVis, 'collection_ERA5');
```

Г.4. Листинг программного кода выбора данных маскированием с помощью растра

```
// Define a palette for the 19 distinct years of loss.
var imagePalette = [
  "#000080", "#0000D9", "#4000FF", "#8000FF", "#0080FF", "#00FFFF",
  "#00FF80", "#80FF00", "#DAFF00", "#FFFF00", "#FFF500", "#FFDA00",
  "#FFB000", "#FFA400", "#FF4F00", "#FF2500", "#FF0A00", "#FF00FF"
];
// Specify the min and max labels and the color palette matching the
labels.
Map.addLayer(image,
  {min: 0, max: 19, palette: imagePalette},
  'forestloss');
function maskL8sr(image) {
  // Bits 3 and 5 are cloud shadow and cloud, respectively.
  var cloudShadowBitMask = (1 << 3);
  var cloudsBitMask = (1 << 5);
  // Get the pixel QA band.
  var qa = image.select('pixel_qa');
  // Both flags should be set to zero, indicating clear conditions.
  var mask = qa.bitwiseAnd(cloudShadowBitMask).eq(0)
    .and(qa.bitwiseAnd(cloudsBitMask).eq(0));
  return image.updateMask(mask);
}
var dataset = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C01/T1_SR')
  .filterDate('2020-01-01', '2020-03-31')
  .map(maskL8sr);
var visParams = {
  bands: ['B4', 'B3', 'B2'],
  min: 0,
  max: 3000,
  gamma: 1.4,
};
Map.setCenter(90.0, 60.03, 10);
Map.addLayer(dataset.median(), visParams);
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Листинг программного кода вычисления суммы значений параметров

```
// Create a ImageCollection from an Earth Engine Table.
var dataset = ee.ImageCollection("ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY")
    .filter(ee.Filter.date('2013-01-01', '2020-12-31'))
    .filter(ee.Filter.calendarRange(3, 11, 'month'));
var parameter = dataset.select('runoff');
// Limit the collection to the 1 last image.
var last = parameter.sort('system:time_start', false).limit(2);
// Limit the collection to the 1 first image.
var fist = parameter.sort('system:time_start', true).limit(2);

// Create function (*1000 - millimeters)
var mult1000 = function(image) {
  var mult = ee.Image(0).expression(
    'runoff * 1000', {
      runoff: image.select('runoff'),
    });
  return image.addBands(mult.rename('mult_mil'));
};

// Second, apply function over collection
var mergedmult = dataset.map(mult1000);

// Create function (*30 - number of days in month, *1000 - mlm)
var mult30 = function(image) {
  var mult = ee.Image(0).expression(
    'runoff * 30*1000', {
      runoff: image.select('runoff'),
    });
  return image.addBands(mult.rename('mult_mil_mon'));
};
// Second, apply function over your collection
var mergedmult = dataset.map(mult30);

var visualizationparam = {
  bands: ['runoff'],
  min: 0.0,
  max: 0.0015,
  palette: [
    "#000080", "#0000D9", "#4000FF", "#8000FF", "#0080FF", "#00FFFF",
    "#00FF80", "#80FF00", "#DAFF00", "#FFFF00", "#FFF500", "#FFDA00",
    "#FFB000", "#FFA400", "#FF4F00", "#FF2500", "#FF0A00", "#FF00FF",
  ]
}
Map.setCenter(90.0, 60.0, 6);
Map.addLayer(last, visualizationparam, "runoff");
Map.addLayer(fist, visualizationparam, "runoff");

Map.addLayer(buz_moth, {color: 'red'}, 'Name');

var paramTimeSeries1 = ui.Chart.image.seriesByRegion({
  imageCollection: mergedmult,
  regions: buz_moth,
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  band: 'mult_mil_mon',
  scale: 200,
  xProperty: 'system:time_start',
  seriesProperty: 'HYBAS_ID'
});
paramTimeSeries1.setChartType('ScatterChart');
paramTimeSeries1.setOptions({
```

```
title: 'runoff mm',
vAxis: {
  title: 'runoff mm'
},
lineWidth: 1,
pointSize: 4,
series: {
  3050415020: {color: 'FF0000'},
  3050424160: {color: '00FF00'},
}
});

print(paramTimeSeries1);
```