



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская работа)

На тему **Оценка влияния изменения лесистости
водосборов на сток по данным об
ежедневных расходах воды**

Исполнитель Азарова Диана Вадимовна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель К.С.Н
(ученая степень, ученое звание)

Тимофеева Лариса Александровна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

к.т.н. доцент

(ученая степень, ученое звание)

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

« 9 » февраль 2022г.

Санкт-Петербург
2022

Список принятых сокращений

ГИС – геоинформационные системы

ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли

ЦМР – цифровая модель рельефа

ИСЗ – искусственный спутник Земли

ОГХ – основные гидрологические характеристики

NDVI – нормализованный разностный вегетационный индекс (англ. Normalized Difference Vegetation Index)

NIR – отражение в инфракрасной области спектра (англ. Near InfraRed)

RED – отражение в красной области спектра

SRTM – радиолокационная топографическая миссия шаттла (англ. Shuttle Radar Topography Mission)

ESA – Европейское космическое агенство (англ. European Space Agency)

LC – растительный покров (англ. Land cover)

CCI – инициатива по изменению климата (англ. Climate Change Initiative)

WGS84 – всемирная система геодезических параметров Земли 1984 года (англ. World Geodetic System 84)

Содержание

Введение.....	4
1. Гидрологическая роль леса.....	7
2. Оценка лесистости	15
2.1 Методы оценки лесистости.....	15
2.2 Оценка лесистости исследуемых водосборов.....	19
2.3 Анализ результатов.....	32
3. Кривые продолжительности суточных расходов воды.....	38
3.1 Построение кривых и их практическое применение.....	38
3.3 Кривые продолжительности суточных расходов воды для исследуемых объектов	44
3.4 Анализ результатов.....	45
Заключение	50
Список использованной литературы.....	51
Приложения	53

Введение

Леса естественным образом способствуют созданию и сохранению запаса воды в речных бассейнах, во многом определяют их водный баланс и внутригодовое распределение стока. Оценка гидрологической роли леса – актуальная, общепризнанная интердисциплинарная задача. Сложность её решения обусловлена необходимостью учитывать различные факторы, связанные с изменением лесистости: масштабы вырубок, восстановление леса, возраст и вид древесных пород, климатические факторы, урбанизацию. Однако, в настоящее время, благодаря развитию технологий получения и обработки данных о состоянии поверхности суши, создаются относительно благоприятные условия для достижения прогресса в рассматриваемом вопросе.

Актуальность темы магистерского исследования обусловлена тем, что лесной покров подвержен природным и антропогенным изменениям, лесные массивы изменяются с течением времени, соответственно возникает необходимость учитывать актуальное состояние лесистости водосборов, обновлять устаревшие справочные данные и развивать методы оценки лесистости, используя ГИС-технологии и доступные данные ДЗЗ.

Цель исследований – оценка влияния изменения лесистости водосборов на сток по данным о расходах воды.

Объекты исследования – водосборы малых рек Псковской области.

Такой выбор был обусловлен тем, что:

- выбранный район является хорошо изученным;
- выбранный район является геологически и климатически однородным;
- площади водосбора рек определены достаточно точно.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать научную литературу по тематике исследования;
- изучить физико-географические условия на выбранных водосборах и собрать гидрографическую информацию о них;
- отобрать оптимальные спутниковые снимки Sentinel-2 и оценить по ним лесистость выбранных водосборов;
- оценить лесистость выбранных водосборов по картам ESA Land Cover;
- выполнить сравнительный анализ полученных разными методами значений лесистости;
- построить кривые продолжительности суточных расходов воды;
- проанализировать возможные изменения стока рек на основе данных о изменении лесистости.

Работа содержит введение, 3 части, заключение, список сокращений, список использованной литературы и 3 приложений.

Первая часть посвящена гидрологической роли леса, проведен всесторонний анализ отечественной и зарубежной литературы, описаны разные концепции и взгляды ученых на влияние лесистости водосборов на сток.

Во второй части рассмотрены разные методы оценки лесистости водосборов, рассмотрены объекты исследования, ландшафтная характеристика территории, произведена оценка лесистости исследуемых водосборов, описан результат полученных данных.

В третьей части рассматриваются кривые продолжительности суточных слоев стока, проведен анализ отклика изменения лесистости на основании кривых для исследуемых объектов.

В заключении представлены общие результаты проделанной работы и обобщенный вывод по всем главам.

1. Гидрологическая роль леса

Лесная гидрология объединяет аспекты двух отдельных дисциплин: гидрологии и лесного хозяйства. Гидрология – это наука, изучающая воды Земли. Гидрология стремится понять, где происходит вода, как вода циркулирует, как и почему распределение воды меняется с течением времени, химические и физические свойства воды, отношение воды к живым организмам. Лесное хозяйство – это наука, которая стремится понять природу лесов и взаимодействия между частями, составляющими лес.

Вода является определяющей частью экосистемы, включая лесную экосистему. Вода формирует физический ландшафт через эрозию и осаждение. Она также формирует биологические части экосистемы своим присутствием или отсутствием, количеством и качеством, а также возникновением и распределением. Круговорот воды играет ключевую роль в функциях экосистемы и процессах.

Леса, в свою очередь, жизненно важны для круговорота и качества воды. По сути, лес действует как гигантская губка, фильтруя и перерабатывая воду.

Листья деревьев перехватывают воду от дождя, снега и тумана; листья также выделяют воду обратно в атмосферу путем эвапотранспирации. Корни деревьев извлекают воду из почвы, помогая удерживать почву на месте. Лесные земли уменьшают поверхностное воздействие падающего дождя за счет перехвата и задержки воды, достигающей поверхности. Лесные угодья также уменьшают количество и скорость ливневого стока над поверхностью земли. Это, в свою очередь, увеличивает количество воды, которая впитывается в землю, часть которой в конечном итоге может пополнять нижележащие водоносные горизонты. И наоборот, вода из гидравлически соединенных поверхностных водоносных горизонтов может поступать в ручьи и водно-болотные угодья, помогая поддерживать их

Влияние изменения лесного покрова на общий объем речного стока уже давно изучается во всем мире. В настоящее время существует несколько концепций о гидрологической роли леса. Некоторые ученые считают, что с увеличением лесистости водосборных бассейнов речной сток возрастает. Другие утверждают, что вырубки леса приводят к уменьшению речного стока.

Ряд отечественных ученых (В. В. Рахманов (1962, 1970), А. П. Бочков (1970), А. В. Лебедев (1964)) считают, что с увеличением процента лесистости водосборных бассейнов речной сток возрастает. Это увеличение, обусловлено тем, что в многолесных районах выпадает больше осадков, чем в безлесных, а также тем, что в лесных районах увеличивается подземная составляющая часть стока и уменьшается величина годичного суммарного испарения.

Б. И. Бобруйко и А. В. Побединский изучили влияние сплошных рубок на сток по данным 5 рек на Среднем Урале. Они пришли к выводу, что после проведения интенсивных рубок суммарный сток имел тенденцию к уменьшению [3]. М. Э. Муратов получил похожие выводы в своей работе по изучению интенсивных рубок лесных территорий на Южном Урале. Его исследования показали, что при изменении лесистости за 15-летний период с 81 до 70 % слой стока уменьшился с 336—484 до 269—433 мм [4]. Данные работы действительно показывают нам, что на исследуемых водосборах происходило уменьшение стока, однако нельзя сказать о точной взаимосвязи уменьшения осадков и обезлесения территорий.

Исследования А. А. Молчанова и П. Ф. Идзона (1959) показали, что не во всех случаях с увеличением лесистости возрастает речной сток, иногда при небольшой лесистости водосборов годовой сток бывает выше, чем при большой [3].

Противоположной точки зрения придерживается ряд отечественных ученых, которые считают, что вследствие большого расхода на транспирацию лес уменьшает речной сток. (М. И. Львович, 1963; А. И. Субботин, 1966; И. С. Шпак, 1968 и др.). Некоторые зарубежные ученые так же считают, что сплошные рубки увеличивают общий сток, поэтому в некоторых случаях, особенно в тех районах, где ощущается недостаток воды, предлагают заменить леса другими угодьями, которые меньше расходуют воды на общую транспирацию (Хибберт, 1967; Пенман, 1968; Хьюлет, 1970; Лалл, 1970 и др.) [3].

По исследованиям Валдайского Филиала ГГИ (ВФ ГГИ) была опубликована работа «Гидрологическая роль леса» (Федорова С. Ф. и Марунича С. В.), которая подтверждает факт того, что над лесными территориями количество осадков превалирует, по сравнению с безлесными и разница в осадках может составлять 15 - 20%. В большей мере эта разница зависит от твердых осадков, нежели от жидких [5]. «Большие значения динамической шероховатости [леса] обуславливают и более интенсивный турбулентный обмен теплом и влагой между подстилающей поверхностью и атмосферой, что приводит к усилению внутримассовых осадков, образующихся над поверхностью суши» [5].

Таким образом, в виду выпадения большего количества осадков над лесным покровом, и несмотря на большее испарение с лесных территорий, нежели чем с безлесных, сток с экспериментальных лесных водосборов ВФ ГГИ выше примерно на 10%, чем сток с экспериментальных полевых бассейнов [5].

Ранее ещё А. И. Воейков (1948) в своих исследованиях на примере лесостепной зоны европейской территории страны утверждал, что даже небольшие лесные массивы способствуют увеличению осадков на 12 - 27 % и объяснял это воздействием шероховатости [6].

Аналогичные исследования проводились В. В. Рахмановым (1962). Автором использовались статистические связи между суммами осадков и лесистостью. Было показано, что увеличение осадков, вызванное влиянием леса, на большей части европейской территории СССР составляет 40 - 60 мм, или около 10 - 12 % годовой суммы осадков [6].

Л. П. Кузнецова (1957) анализировала данные об осадках на равнинной территории ЕТС и в Кулундинской степи в Западной Сибири. По ее данным, в отдельных районах при увеличении лесистости от 18 до 100 % количество осадков возрастает до 60 мм в год. Подобные исследования были выполнены А. В. Лебедевым (1964) в бассейнах рек Оби, Иртыша и Енисея. Установлено, что в среднем при возрастании лесистости на каждые 10 % увеличение годовой суммы осадков составляет 12—13 мм. Еще более сильное воздействие леса на формирование осадков было выявлено Р. В. Опритовой (1978) для Приморского края. По данным А. И. Миховича (1973), в Житомирской области увеличение жидких осадков над лесными массивами составляет около 10%. Аналогичные результаты получены В. В. Осиповым (1967) для Ярославской области [6].

Однако, в последнее время предстоящее изменение климата поставило еще одну задачу для исследования взаимосвязей климата, гидрологии и экосистем. Появилась тенденция нивелирования связи количества выпавших осадков над лесными и безлесными водосборами. Вследствие увеличения зимних температур и увеличения жидких атмосферных осадков, разница в осадках между лесным и безлесным водосбором стала выравниваться в значениях. На территории Европейской части России происходит изменение характера атмосферной циркуляции – преобладание в течение года осадков, связанных с циклонической циркуляцией. Количество же внутримассовых осадков, которые в большей мере зависели от шероховатости подстилающей поверхности, стало стремительно сокращаться [5].

Также существует концепция, что сток после интенсивных вырубок леса не падает, а наоборот растет. Поскольку испарение с лесной территории гораздо больше, чем с обезлесенной.

«В первые 1—15 лет после вырубки старого леса испарение резко снижается, а сток увеличивается. К 20-летнему возрасту нового леса испарение и сток приближаются к значениям, наблюдаемым на площадях со спелым 100-летним лесом. Эти значения мы условно принимаем за норму. В период с 25 по 50—60 лет испарение с участков возрастает, а годовой сток резко снижается — до 50—60 % нормы. В дальнейшем водопотребление лесными комплексами уменьшается, а сток возрастает и к 100-летнему возрасту леса достигает своей нормы. В последующие годы (120—150 лет) лес стареет, его водопотребление несколько снижается, а сток увеличивается» [7]. (рис.1.1)

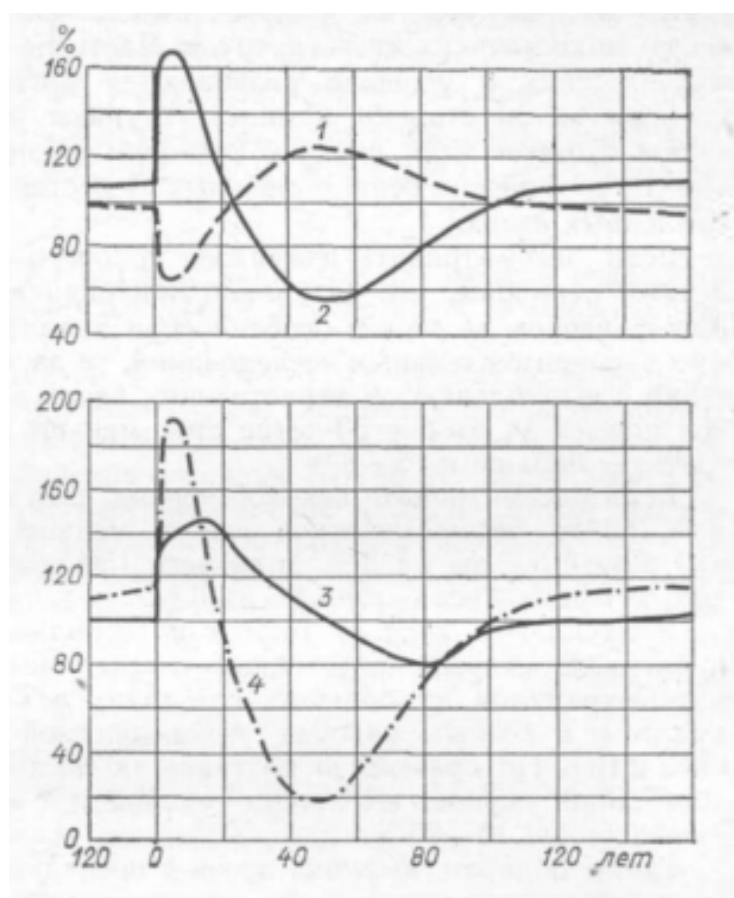


Рисунок 1.1 – Влияние возраста леса на средние многолетние значения суммарного испарения за год (1) и стока (в % к норме).

Гидрологической лабораторией Ковита производились масштабные исследования на трёх экспериментальных водосборах в западной части Северной Каролины, США. Два бассейна были полностью вырублены без вывоза лесной продукции, при чем один из них был вырублен дважды. Третий был демонстрацией лесопользования и получил сочетание всего: прореживание лесов, вырубка и частично был оставлен. Все три бассейна находятся в одной долине, в пределах 4 км друг от друга, и три процедуры были проведены одновременно.

С помощью этого уникального набора экспериментов наблюдались реакции потока на: (а) два периода восстановления в одном и том же бассейне с разницей в 23 года, (б) одновременные периоды восстановления для двух бассейнов с вырубкой на разных высотах и (в) одновременные периоды восстановления в двух бассейнах с высокой высотой - один частично вырублен, а другой вырублен. Сообщается об изменениях в стоке ручья сразу после вырубке и по мере восстановления леса, которые связаны с изменениями растительности, климата и высоты бассейна.

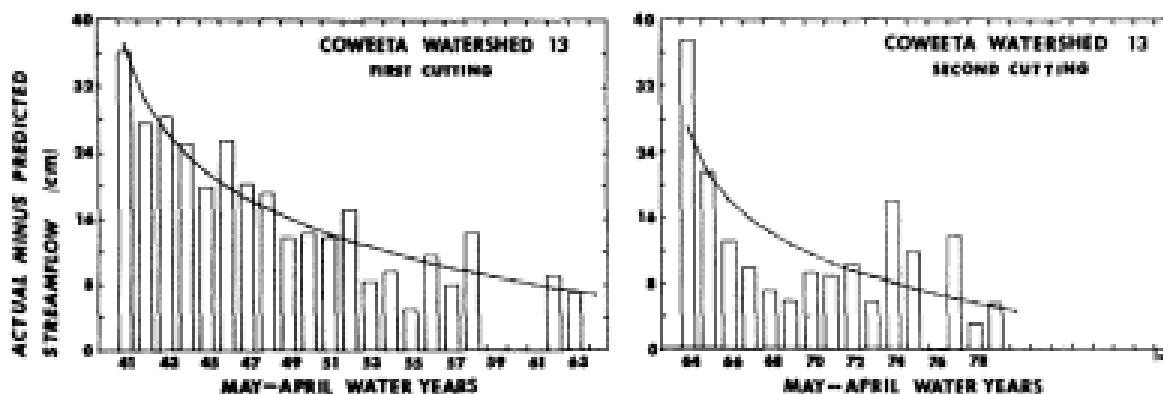


Рисунок 1.2 – Возрастание стока после двух вырубок.

После того как лес на водосборе был вырублен в 1940г, сток увеличился на 362 мм, что на 65% превысило прогнозируемый сток (рис.1.2). Анализируя кривую, соответствующую последующим падениям расходов, авторы предположили, что значения стока вернулись бы в изначальные границы лишь

к 1975 году. Однако, в 1963 году лес был вырублен во второй раз и значения стока увеличились на 375 мм, что на 40% превысило прогнозируемый сток относительно до экспериментальных значений. [8]

Результаты этих экспериментов ясно показывают, что сток речных бассейнов увеличивается при вырубке леса и что этот прирост уменьшается по мере восстановления растительности. Возобновление роста растительности является доминирующим изменением, происходящим после вырубki леса в бассейне.

Из упомянутых выше различных концепций и взглядов ученых на влияние изменения лесистости территорий на речной сток, можно сделать вывод, о чрезвычайно сложной связи всех компонентов водного баланса и влияющих на них факторов. Вследствие этого, огромное значение имеет характер расположения бассейна в тех или иных географических условиях.

Лучшим примером этого утверждения является исследование J. J. McDonnell и J. Evaristo, в котором была построена карта интенсивности влияния зарастания/обезлесения территорий на речной сток (рис.1.3). Карта была составлена на основании моделирования около 400 тыс. водосборных бассейнов.

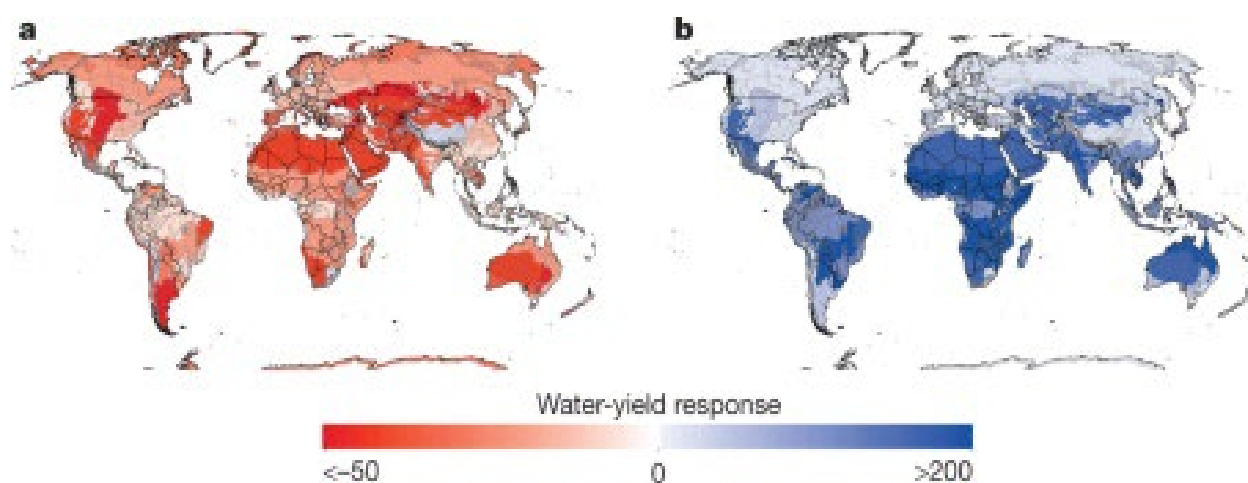


Рисунок 1.3. – Карта интенсивности влияния залесения (а) и обезлесения (b) на речной сток в процентах от нормальных значений

Из анализа представленной карты следует, что, например, вырубка лесов в субэкваториальных и тропических широтах ведет к гораздо большему возрастанию стока, чем вырубка лесов, например, в северном бореальном поясе, где реакция стока будет не такой яркой.

Леса представляют собой неотъемлемую функцию гидрологического режима, и в случае интенсивных вырубок они могут оказать значительное воздействие на водные ресурсы. Потеря лесных массивов не только прерывает гидрологический цикл, но также приводит к сильной эрозии, препятствует поглощению питательных веществ и нарушает пищу и среду обитания для водных экосистем. По сути, изменение лесного ландшафта оказывает прямое влияние на гидрологический режим, поэтому крайне важно понимать влияние деятельности человека на леса для дальнейшего улучшения управления земельными и водосборными бассейнами.

2. Оценка лесистости

2.1 Методы оценки лесистости

Существуют разные методы оценки лесистости водосборов. Данные могут быть получены из справочника Основные гидрологические характеристики (ОГХ). Однако, на сегодняшний день их нельзя отнести к источнику достоверной, количественной и качественной характеристики лесов.

Давность проведения лесоустройства более 10 лет имеет 81,5 % лесов, при этом на площади 533,9 тыс. га лесоустройство не проводилось вообще. Отсюда возникает вопрос актуализации существующих данных. В настоящее время есть возможность оценить современное состояние лесного покрова благодаря данным аэрофотосъемки и данным дистанционного зондирования Земли. Аэрофотоснимки и спутниковые изображения позволяют точно картировать земной покров и делают особенности ландшафта понятными в региональном, континентальном и даже глобальном масштабах.

Аэрофотосъемка – техника фотографирования земной поверхности или особенностей ее атмосферы или гидросферы с помощью фотокамер, установленных на самолетах, ракетах или спутниках, находящихся на околоземной орбите, и других космических аппаратах. (рис. 2.1)



Рисунок 2.1 – Пример аэрофотосъемки

Для картографирования наземных объектов аэрофотоснимки обычно делаются сериями перекрывающихся снимков с самолета, выполняющего систематическую схему полета на фиксированной высоте. На каждой фотографии изображена территория, включающая несколько контрольных точек, расположение которых определяется геодезическими методами. Техника, известная как фотограмметрия, предполагающая одновременное проецирование перекрывающихся видов, позволяет получить контурные карты или трехмерные модели земной поверхности, которая была сфотографирована. Ценные данные о топографии, геологии, гидрологии, почве и растительности, метеорологии, океанских течениях и рыбных ресурсах стали доступными благодаря использованию спутниковых технологий и экспертной интерпретации.

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) – процесс обнаружения и мониторинга физических характеристик местности путем измерения ее отраженного и испускаемого излучения на расстоянии (обычно со спутника

или самолета). Специальные камеры собирают изображения с помощью дистанционного зондирования, которые помогают исследователям «чувствовать» то, что происходит на Земле.

Технологии ДЗЗ – незаменимый инструмент изучения и постоянного мониторинга нашей планеты, помогающий эффективно использовать и управлять ее ресурсами. Космические снимки являются самым достоверным источником информации для проектов глобального изучения Земли, позволяют выполнять измерения быстрее и экономичнее по сравнению с авиационными и наземными измерениями.

Современные технические возможности позволяют использовать изображения, полученные с искусственных спутников Земли на компьютере, а новейшие программные продукты дают возможность легко и быстро их обрабатывать. Поэтому данные дистанционного зондирования становятся повседневным источником актуальной и объективной информации, и безусловно имеют широкий спектр применений в различных областях, в том числе – для исследования состояния поверхности речных бассейнов.

Стоит отметить, что актуальность развития методик применения данных дистанционного зондирования Земли вызывает большой интерес для нужд гидрологии. Применение методов для целей гидрологических исследований включает в себя: мониторинг ледовой обстановки, мониторинг снежного покрова, мониторинг наводнений и паводков, мониторинг лесного покрова, мониторинг экологических катастроф, мониторинг опасных природных явлений, оценка загрязненных земель на территории водосбора, уточнение гидрографических характеристик водных объектов и др. [12,13]

Применение современных информационно-измерительных систем при решении гидрологических задач таких, как:

- Определение морфометрических характеристик водных объектов и их водосборов;

- Прогнозирование и контроль наводнений и паводков и моделирование их сценариев;
- Определение гидрографических характеристик (порядок притоков, площадь бассейна, длину и средний уклон, среднюю высоту и другие характеристики);
- Распространение снежного покрова;
- Определение зон затоплений и подтоплений;
- Оценка деградации земель, пространственные риски эрозии;
- Оценка влияния пространственного распределения метеорологических параметров на потребности в оросительной воде;
- Оценка залесенности, заболоченности и озерности водосборов.

2.2 Оценка лесистости исследуемых водосборов

Для исследования были выбраны водосборы рек Псковской области (рис.2.2), которые были выделены на базе цифровой модели рельефа SRTM. Выбранные водосборы принадлежат бассейну Балтийского моря.

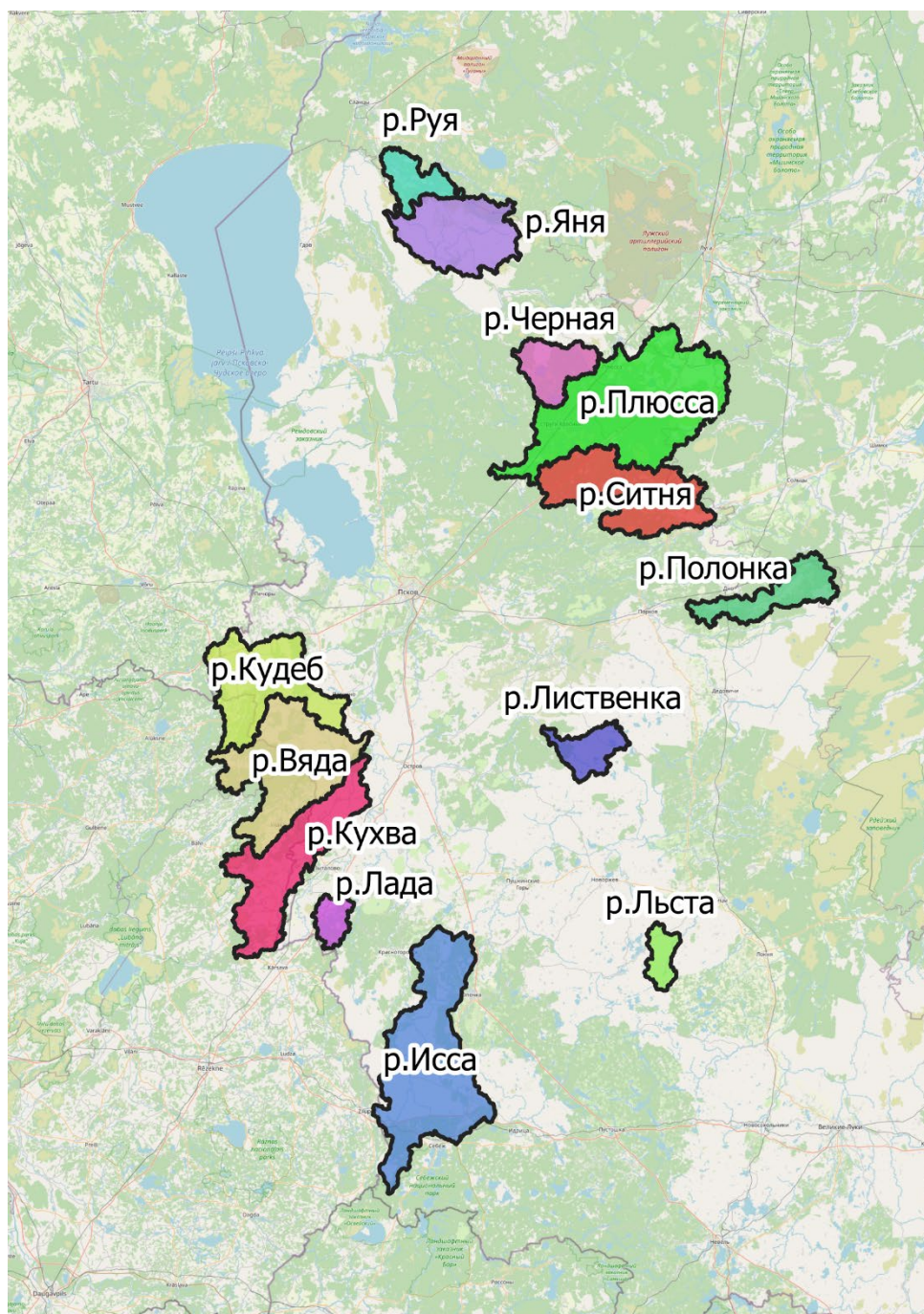


Рисунок 2.2 – Объекты исследования

Псковская область расположена на северо-западе Восточно-Европейской (Русской) равнины, для нее характерен достаточно расчлененный рельеф с чередованием холмисто-грядовых пространств,

значительная лесистость с преобладанием смешанных лесов, обилие озер и большое количество малых и средних рек. Рельеф преимущественно низменно-холмистый (средняя высота — 110 м над уровнем моря) с тремя явно выделяющимися возвышенностями: Лужская возвышенность на севере области с максимальной высотой 204 м (гора Кочербуж), Судомская возвышенность в средней части с высшей точкой 293 м (гора Судома) и Бежаницкая возвышенность на юге с максимальной высотой всей области — 339 м (Лобновский массив, в том числе Липницкая (339,1 м) и собственно гора Лобно высотой 337,9 м) [9].

На западе, в Печорском районе, находятся восточные склоны возвышенности Хаанья (заходящей с территории Эстонии и Латвии), а на юго-востоке — западные склоны Валдайской возвышенности, на границе с Тверской областью, переходящее в Усмынское поднятие. На юге на границе с Белоруссией расположены северные участки Невельско-Городокской возвышенности. Между ней и Бежаницкой находится Вязевская возвышенность с высотой до 264 м, переходящая на юг в Невельское поднятие (до 201 м), на запад — в Себежские гряды (до 202—213 м), на восток — в Великолукские гряды (включая Воробьёвы горы, 160—210 м) [11].

Минимальная высота области — урез Псковско-Чудского озера — составляет 30 м над уровнем моря. В западной части региона находится Псковская низменность, по которой течёт река Великая, а на востоке — Приильменная низменность, по которой течёт вторая главная водная артерия области — река Ловать. На севере между Лужской и Судомской возвышенностями находится Хиловская низина, а в средней части области (между Судомской и Бежаницкой возвышенностями) — Соротская низина. На крайнем севере находится Плюско-Лужская низменность [11].

Особая гордость и богатство Псковской области — это водные ресурсы. На территории более 3700 озер, самым крупным, из которых является Псковско-Чудское озеро, площадь которого составляет 3521 кв. км. В озеро

впадает свыше 30 рек и речек, вытекает р. Нарва. Больше всего озер в южной части области [10].

Одно из главных богатств – леса, занимающие более трети территории области. Общие запасы древесины на 1 января 2005 года составляли 331,2 млн. м³. На хвойные породы приходится 45 % земель лесного фонда, березы занимают 34,5 % земель. Расчетная годовая лесосека по рубкам главного пользования составляет 3,5 млн. м³. Реально осваивается около 30 % [10].

Около 38 % территории области составляют леса (20 685 км², в том числе 12 135 км² занимают лиственные леса, 8550 км² — хвойные леса). Около 6 % — водоёмы (3130 км²). Около 10 % — болота (вместе с заболоченными территориями — 16 % или до 8500 км²).

Исходные данные о площади водосборов исследуемых объектов и их лесистости были получены из издания Основные гидрологические характеристики (ОГХ) за 1966 год. (таблица 2.1)

Таблица 2.1 – Справочные данные по исследуемым водосборам

Река – пост	F, км ²	Лесистость, %
р. Льста – д. Глазатово	122	49
р. Лада – д. Рушляки	188	26
р. Руя – д. Малые Рожки	219	73
р. Лиственка – д. Красики	248	32
р. Чёрная – д. Большое Захонье	294	49
р. Полонка – д. Новые Буриги	433	37
р. Кудеб – д. Свериково	739	38
р. Яня – д. Лавынь	746	65
р. Кухва – д. Кахново	825	18
р. Ситня – д. Пески	906	56
р. Вяда – д. Латышево	1120	40
р. Исса – д. Визги	1410	53
р. Плюсса – с. Плюсса	1440	52

Для сравнения был проведен расчёт точности определения площади водосборов исследуемых рек, полученных из справочных данных, представленных в ОГХ и рассчитанных по цифровой модели рельефа. (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Точность определения площади водосборов рек.

Река – пост	F (ОГХ), км ²	F (SRTM), км ²	Погрешность, %
р. Льста – д. Глазатово	122	145	-18,9
р. Лада – д. Рушляки	188	147	21,8
р. Руя – д. Малые Рожки	219	223	-1,8
р. Лиственка – д. Красики	248	235	5,2
р. Чёрная – д. Большое Захонье	294	304	-3,4
р. Полонка – д. Новые Буриги	433	375	13,4
р. Кудеб – д. Свериково	739	798	-8,0
р. Яня – д. Лавынь	746	652	12,6
р. Кухва – д. Кахново	825	906	-9,8
р. Ситня – д. Пески	906	814	10,2
р. Вяда – д. Латышево	1120	1066	4,8
р. Исса – д. Визги	1410	1390	1,4
р. Плюсса – с. Плюсса	1440	1583	-9,9

Погрешность определения площади водосбора не превышает 20%, за исключением р. Лада – д. Рушляки. Для 8 водосборов из 13 ошибка не превышает 10%. В 6 объектах ошибка принимает отрицательный знак, что свидетельствует о завышении полученных значений относительно справочных данных. Таким образом, выделенные водосборов можно принять приемлемыми для использования.

Исследование было проведено с использованием мультиспектральных космических снимков высокого разрешения со спутника Sentinel-2 за июнь-август 2017-2018 года. В работе использовались снимки с минимальным покрытием облаками (< 1 %). Данный спутник был выбран, поскольку он

обладает лучшим разрешением среди доступных. Снимки были взяты с портала Геологической службы США (USGS), где они хранятся в открытом доступе [2].

Sentinel-2 – это широкополосная многоспектральная миссия по созданию изображений с высоким разрешением. Его оптический прибор производит выборки в 13 спектральных диапазонах: четыре диапазона на расстоянии 10 метров, шесть диапазонов на расстоянии 20 метров и три диапазона с пространственным разрешением 60 метров.

Таблица 2.3. Данные по Sentinel-2 полученные на 13 спектральных диапазонах [15].

Название канала	Разрешение, м	Центральная длина волны, нм	Ширина полосы, нм	Цель
B01	60	443	20	Обнаружение аэрозоля
B02	10	490	65	Синий
B03	10	560	35	Зеленый
B04	10	665	30	Красный
B05	20	705	15	Классификация растительности
B06	20	740	15	Классификация растительности
B07	20	783	20	Классификация растительности
B08	10	842	115	Ближний ИК
B08A	20	865	20	Классификация растительности
B09	60	945	20	Водяной пар
B10	60	1375	30	Перистые облака
B11	20	1610	90	Снег/лёд/облачность
B12	20	2190	180	Снег/лёд/облачность

Миссия, посвященная европейской программе «Коперник», поддерживает оперативные приложения, в первую очередь для наземных

служб, включая мониторинг растительности, почвы и водного покрова, а также наблюдение за внутренними водными путями и прибрежными районами.

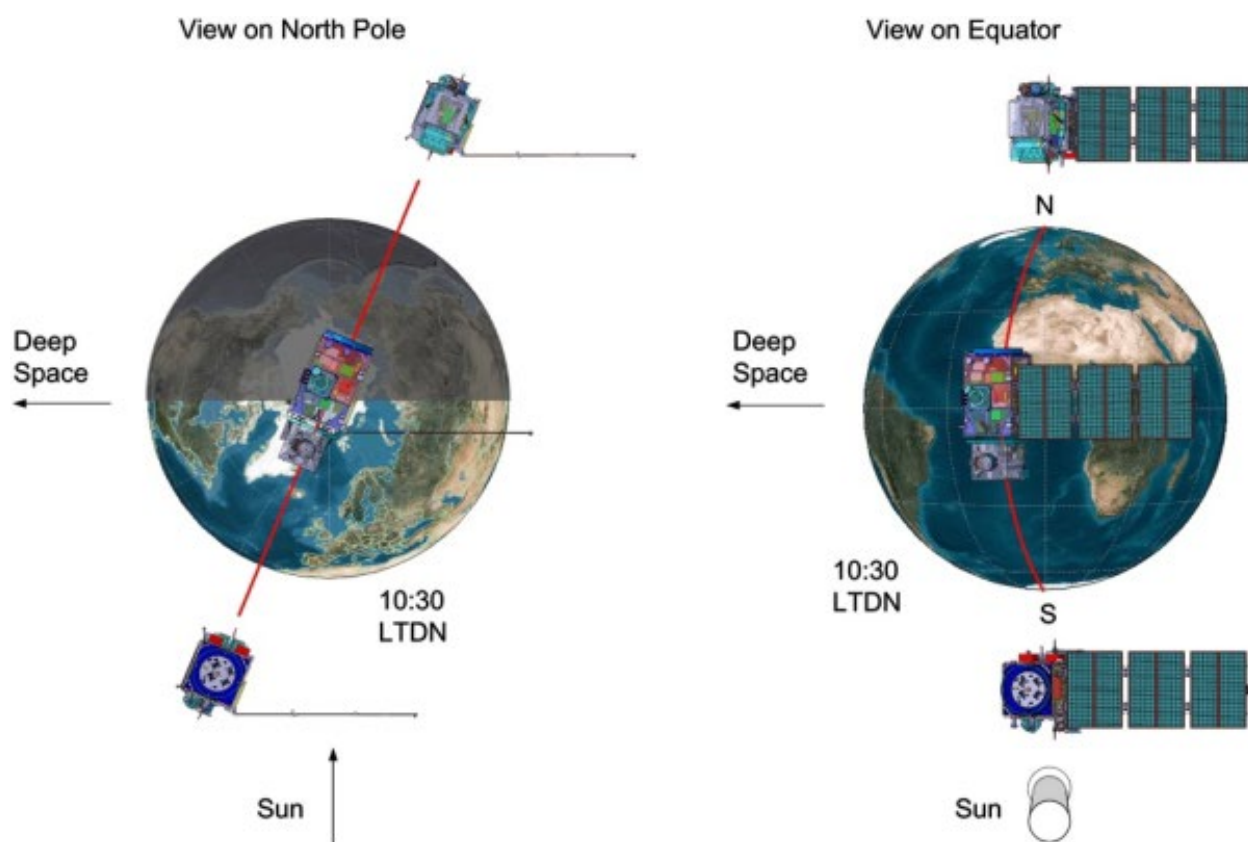


Рисунок 2.3 – Орбитальная конфигурация спутника SENTINEL-2

Миссия основана на группировке из двух идентичных спутников на одной орбите, расположенных на расстоянии 180° друг от друга для оптимального охвата и доставки данных (рис 2.3). Вместе они покрывают все поверхности суши Земли, большие острова, внутренние и прибрежные воды каждые пять дней на экваторе.

Эта уникальная программа мониторинга окружающей среды вносит существенные изменения в то, как мы управляем нашей окружающей средой, понимаем и устраняем последствия изменения климата и защищаем повседневную жизнь.

Миссия в основном предоставляет информацию о методах ведения сельского и лесного хозяйства и для оказания помощи в обеспечении

продовольственной безопасности. Спутниковые снимки могут быть использованы для определения различных показателей растений, таких как площадь листьев, хлорофилл и показатели содержания воды.

Это особенно важно для эффективного прогнозирования урожайности и приложений, связанных с растительностью Земли.

Помимо мониторинга роста растений, Sentinel-2 может использоваться для картирования изменений в почвенном покрове и мониторинга лесов в мире. В нем также содержится информация о загрязнении озер и прибрежных вод. Изображения наводнений, извержений вулканов и оползней способствуют составлению карт стихийных бедствий и помогают усилиям по оказанию гуманитарной помощи.

Методика оценки лесистости водосборов

Для оценки лесистости водосборов был рассчитан индекс вегетационной активности NDVI по данным со спутника Sentinel-2.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) — простой количественный показатель фотосинтетически активной биомассы. NDVI изменяется в пределах от -1 до +1, что подчеркивает контраст обнаженных пород и почв с зеленой растительностью, позволяет разделить разные типы растительности. Так, для водных объектов он принимает отрицательные значения; для почв, грунтов, сухой растительности близок к нулю; максимальные значения характерны для вегетирующей растительности и разные — для различных состояний растительного покрова. Значения индекса возрастают с развитием зеленой биомассы и уменьшаются с её усыханием. В то же время одни и те же значения вегетационного индекса могут соответствовать экологически различным категориям естественной и культурной растительности, что составляет основную трудность использования NDVI для установления особенностей пространственного размещения лесных массивов. Для минимизации погрешностей в оценке

древесно-кустарниковой растительности, которая являлась основным объектом изучения, были выбраны летние снимки.

Расчёт индекса выполняется по формуле (2.1):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (2.1)$$

где NIR – отражение в инфракрасной области спектра,

RED – отражение в красной области спектра.

Для снимков Sentinel-2 – это соответствует каналам 8 и 4. Таким образом, формула (2.1) приобретает следующий вид (2.2):

$$NDVI = \frac{Band8 - Band4}{Band8 + Band4} \quad (2.2)$$

Построения и расчеты производились в программе ArcGIS. По спутниковым снимкам, полученным при комбинации «естественного цвета», с целью создания обучающей выборки, выделялись эталонные участки, которые были разбиты по определенным группам, имеющимся на исследуемой территории (леса, поля, водные объекты, искусственные постройки, облачность). Используя метод максимального подобия (инструмент «Maximum Likelihood Classification»), была классифицирована карта вегетационной активности NDVI на однотипные участки. Таким образом были получены карты залесенных участков водосборов исследуемых рек (пример, рис. 2.4) и рассчитана площадь, покрытая лесом.

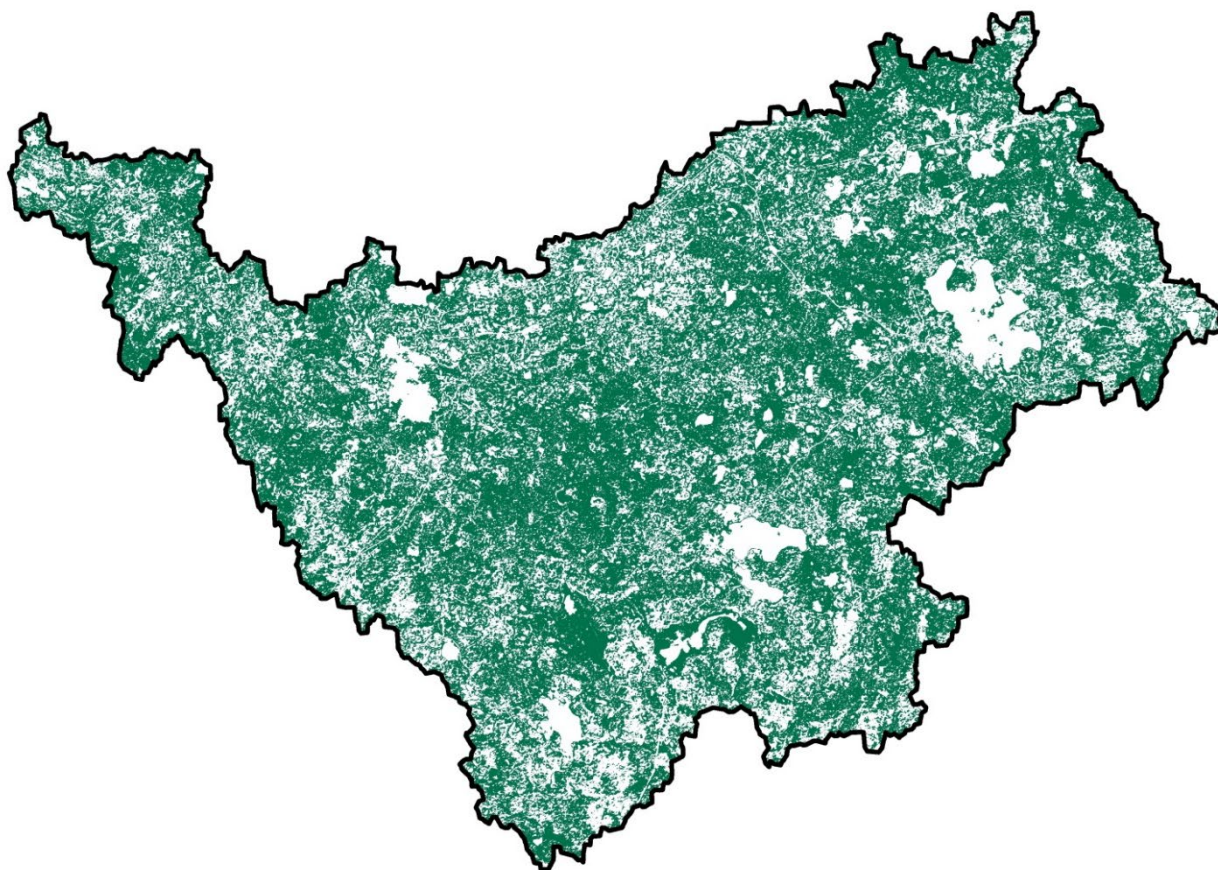


Рисунок 2.4 – Карта залесенного участка водосбора р. Лиственка – д. Красики.

Карты ESA Land cover.

ESA – Европейское космическое агентство (ЕКА), занимающееся исследованием и использованием космоса. Основано в 1975 году на базе Европейской организации по космическим исследованиям и Европейской организации по разработке ракет носителей. Объединяет усилия 22 европейских государств-членов для разработки и эксплуатации ИСЗ хозяйственно-прикладного назначения.

ESA Land Cover был создан в рамках Инициативы ESA по изменению климата (CCI). Эта программа направлена на расширение баз данных основных климатических переменных за счет использования долгосрочных глобальных архивов наблюдений Земли. Кроме того, цель набора данных состоит в том, чтобы предоставить «точную классификацию растительного

покрова, которая может служить сообществу по моделированию климата». Набор данных был получен удаленно с помощью спектрометра изображений среднего разрешения Envisat, который обеспечивает пространственное разрешение 300 м всей земной поверхности Земли. Набор данных интерпретируется автоматически. Он охватывает временные ряды с 1992 по 2020 год (рис.2.5) и содержит 38 классов растительного покрова, которые основаны на «Системе классификации растительного покрова ООН».

Входной набор данных состоит из глобальных временных рядов, полученных Envisat MERIS с полным и уменьшенным разрешением (FR и RR соответственно) и с датчиков точечной растительности (SPOT-VGT). Их особенности подробно описаны в табл.2.4

Таблица 2.4. Характеристики технологической цепочки CCI-LC

Датчик	Пространственное разрешение	Период	Размер
MERIS FR	300м	2003-2012	~15Тб/год
MERIS RR	1000м	2003-2013	~2,5Тб/год
SPOT-VGT	1000м	1998-2002	~450Гб/год

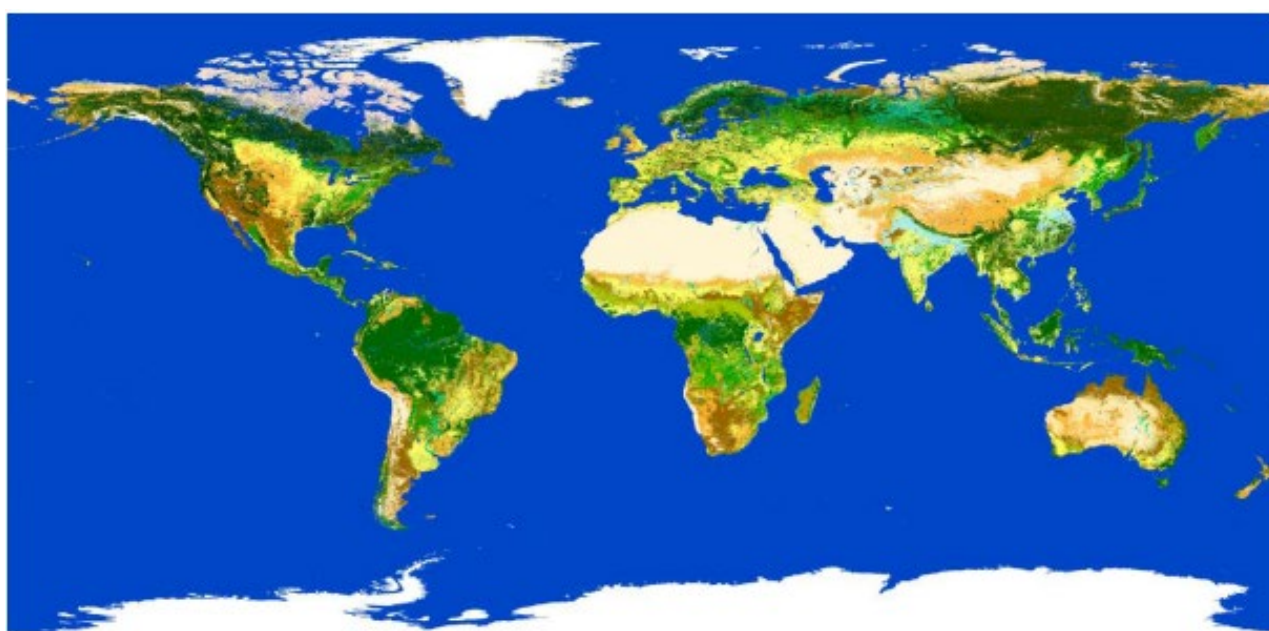


Рисунок 2.5 – Карта из серии LC (растительного покрова) за 2015 г.

Система координат, используемая для глобальной базы данных о растительном покрове, представляет собой географическую систему координат, основанную на эталонном эллипсоиде Всемирной геодезической системы 84 (WGS84).

На рисунке 2.6 представлена главная страница интерфейса визуализации карт CCI-LC. Веб-интерфейс включает в себя: непосредственно саму карту растительного покрова за выбранный период времени с 1992 по 2020 год, условные обозначения карты, руководство пользования и описание функциональных возможностей. При выборе конкретной территории (щелчок правой мыши) активируется отображение дополнительных графиков сезонного распределения снега, вегетационной активности и сгоревших участков растительного покрова.

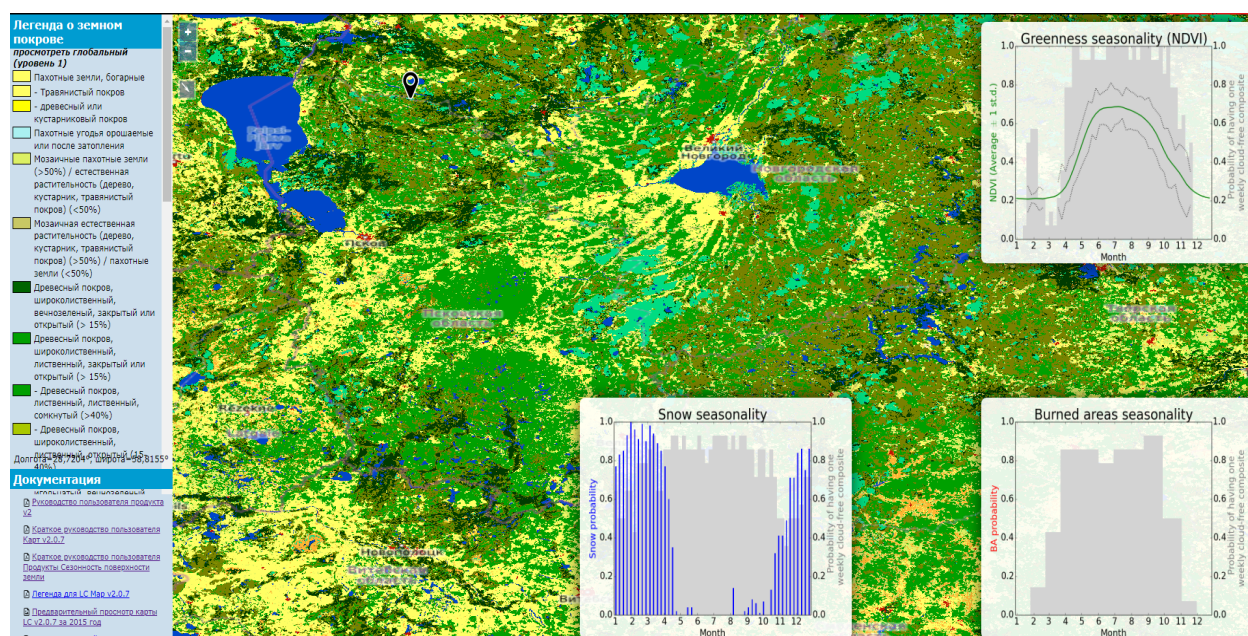


Рисунок 2.6 – Главная страница карт ESA Land Cover

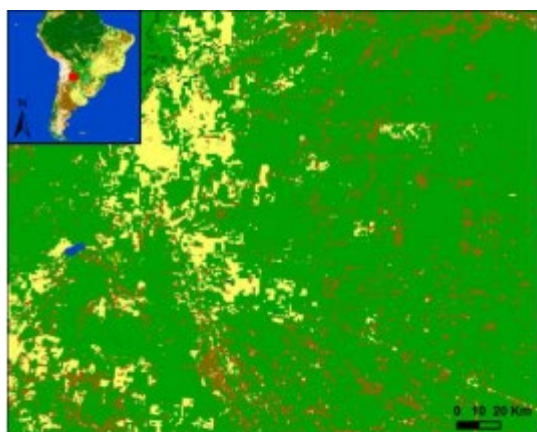
На сегодняшний день, в постоянно меняющихся условиях возрастает потребность в точной своевременной информации о растительном покрове и землепользовании с высоким разрешением и большей точностью. Однако до сих пор региональные или континентальные карты растительного покрова либо использовали изображения с низким разрешением (> 100 м) в качестве

входных данных, либо основывались исключительно на данных оптического наблюдения Земли с высоким разрешением, таких как Sentinel-2 или Landsat.

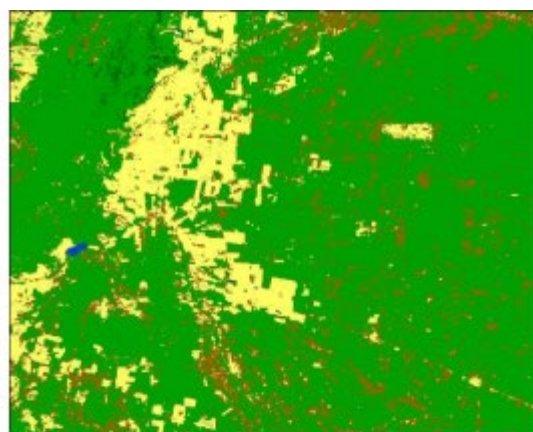
С этой целью, команда ESA WorldCover разработала свободно доступный новый продукт глобального земного покрова с разрешением 10 м и представила его в октябре 2021 года. Карты растительного покрова основаны на данных спутников Sentinel-1 и Sentinel-2, содержащего 11 классов растительного покрова и независимо оцениваются с глобальной общей точностью 74,4%.

Используя данные карт ESA Land Cover, находящихся в открытом доступе, можно наглядно отследить изменчивость растительного покрова любых исследуемых объектов (рис 2.7).

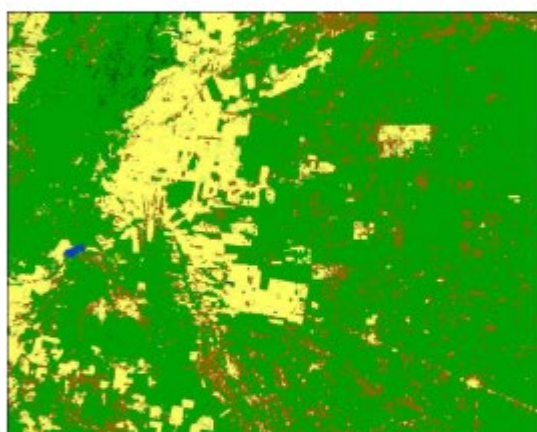
Оценка лесистости водосборов исследуемых рек по картам ESA WorldCover проводилась в программе QGIS. С открытого источника были получены данные на рассматриваемую территорию Псковской области. Для дальнейшей обработки полученные растры были склеены в единый растр растительного покрова. С помощью инструмента «Extract by mask» были выделены интересующие водосборы и преобразованы в векторный формат. Далее были оставлены только полигоны с лесным покровом и рассчитана общая площадь лесистости водосбора.



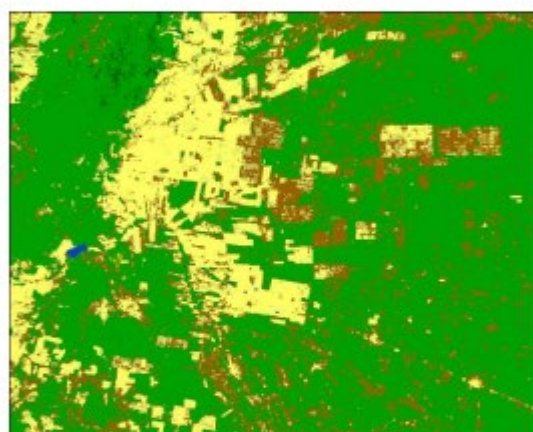
Year 1992



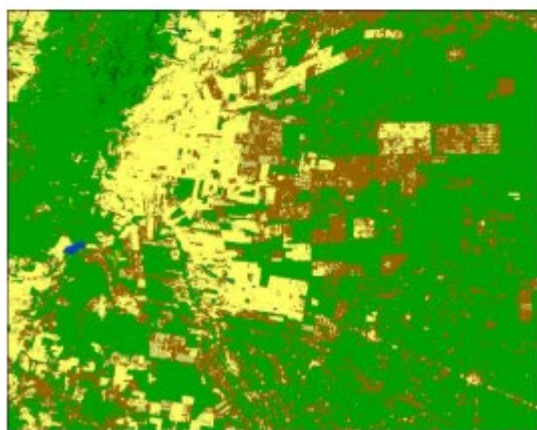
Year 2000



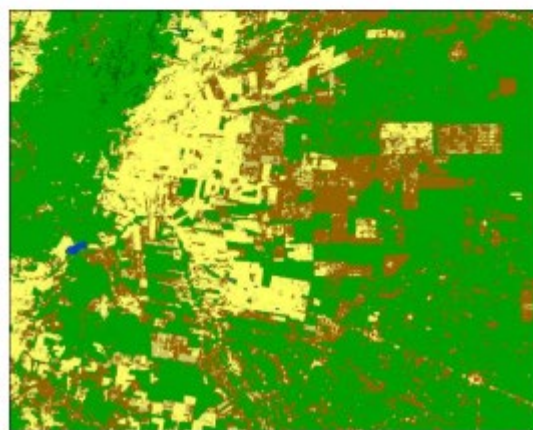
Year 2004



Year 2007



Year 2011



Year 2015

Рисунок 2.7 – Пример глобальных ежегодных карт растительного покрова CCI за 1992, 2000, 2004, 2007, 2011 и 2015 годы для района провинции Сальта в Аргентине.

2.3 Анализ результатов

Результат оценки площади лесных участков на исследуемых водосборах по индексу NDVI приведен в таблице 2.5. По полученным данным, можно утверждать об изменении лесистости водосборов рек, но нельзя дать точную оценку по ряду причин:

- рассчитанная площадь водосборов рек отличается от справочных данных;
- исследование территории происходит в разные временные интервалы;
- оценка лесистости проводилась по разномасштабным картографическим материалам.

Таблица 2.5 – Результат оценки лесистости водосборов

Река – пост	Лесистость, %	
	ОГХ (1966 г.)	NDVI (2017-2018 г.)
р. Льста – д. Глазатово	49	88
р. Лада – д. Рушляки	26	67
р. Руя – д. Малые Рожки	73	67
р. Лиственка – д. Красики	32	62
р. Чёрная – д. Большое Захонье	49	61
р. Полонка – д. Новые Буриги	37	88
р. Кудеб – д. Свериково	38	40
р. Яня – д. Лавынь	65	53
р. Кухва – д. Кахново	18	47
р. Ситня – д. Пески	56	76
р. Вяда – д. Латышево	40	58
р. Исса – д. Визги	53	65
р. Плюсса – с. Плюсса	52	59

Для сравнения значений и применения в качестве опорного промежуточного материала была использована топографическая карта Псковской области за 2001 год (Приложение 2) [24]. Была проведена автоматическая оцифровка лесного покрова и учтен коэффициент потери лесного покрова под условными обозначениями и координатной сеткой.

Откорректированные данные лесистости водосборов, полученные с топографической карты Псковской области за 2001 год, представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Лесистость водосборов с учетом поправочного коэффициента по топографической карте Псковской области за 2001 год

Река – пост	Залесенность водосбора, км ²
р. Льста – д. Глазатово	72
р. Лада – д. Рушляки	34
р. Руя – д. Малые Рожки	116
р. Лиственка – д. Красики	83
р. Чёрная – д. Большое Захонье	138
р. Полонка – д. Новые Буриги	143
р. Кудеб – д. Свериково	280
р. Яня – д. Лавынь	435
р. Кухва – д. Кахново	176
р. Ситня – д. Пески	420
р. Вяда – д. Латышево	372
р. Исса – д. Визги	480
р. Плюсса – с. Плюсса	758

Кроме того, была произведена оценка лесистости водосборов по картам Европейского космического агентства (ESA). Эти карты позволяют получить актуальные данные о состоянии лесистости территорий на 2020 год. Данные карты были представлены в октябре 2021 года командой ESA WorldCover. В таблице 2.7 представлены результаты, полученные по картам ESA в сравнении с данными, полученными при помощи оценки лесистости по индексу NDVI.

Таблица 2.7. Результаты оценки лесистости водосборов, полученных по картам ESA WorldCover и рассчитанные по индексу NDVI.

Река – пост	Лесистость, %	
	NDVI (2017-2018 г.)	ESA WorldCover (2020 г.)
р. Льста – д. Глазатово	88	88
р. Лада – д. Рушляки	67	67
р. Руя – д. Малые Рожки	67	83
р. Лиственка – д. Красики	62	86
р. Чёрная – д. Большое Захонье	61	79
р. Полонка – д. Новые Буриги	88	73
р. Кудеб – д. Свериково	40	73
р. Яня – д. Лавынь	53	91
р. Кухва – д. Кахново	47	46
р. Ситня – д. Пески	76	90
р. Вяда – д. Латышево	58	69
р. Исса – д. Визги	65	90
р. Плюсса – с. Плюсса	59	84

По представленным результатам, можно сделать вывод, что карты ESA WorldCover не подходят для количественной оценки лесистости водосборов, поскольку дают значительную погрешность (пример рис.2.8). Несмотря на то, что Европейское космическое агентство обладает наибольшим количеством ресурсов для обработки спутниковых снимков и получения карт растительного покрова, нет точного описания алгоритма получения этих данных. Возможно, при обработке была задана единая сигнатура (эталонные участки) по всей планете. Соответственно, это дает наибольшую погрешность, чем при определении эталонных участков для конкретной исследуемой территории.



Рисунок 2.8 – Сравнение спутникового снимка и карты ESA WorldCover

Выводы заключаются в том, что точность классов сильно различается и что общая точность ESA по сравнению с набором данных Sentinel-2 довольно низкая, хотя все еще приемлема для глобального набора данных. Однако сравнение только лесных массивов дает гораздо лучшие результаты. Наконец, сравнение этих наборов данных имеет некоторые проблемы, но, несмотря на это, мы можем использовать базу данных ESA WorldCover для получения приблизительных значений лесного покрова.

Таблица 2.8. Сводная таблица лесистости исследуемых водосборов рек Псковской области

Водосбор	Лесистость, %		
	ОГХ (1966 г.)	Карта (2001 г.)	NDVI (2017-2018 г.)
р. Яня – д. Лавынь	65	94	53
р. Руя – д. Малые Рожки	73	86	67
р. Ситня – д. Пески	56	85	76
р. Плюсса – с. Плюсса	52	80	59
р. Чёрная – д. Большое Захонье	49	75	61
р. Кудеб – д. Свериково	38	58	40
р. Льста – д. Глазатово	49	83	88
р. Лада – д. Рушляки	26	38	67
р. Лиственка – д. Красики	32	59	62
р. Полонка – д. Новые Буриги	37	63	88
р. Кухва – д. Кахново	18	32	47
р. Вяда – д. Латышево	40	58	58
р. Исса – д. Визги	53	52	65

Сравнительный анализ результатов определения лесистости водосборов. В таблице 2.8 представлена разница между залесенностью, полученной по справочным данным, топографической карте и данным ДЗЗ. С учётом данных, полученных при оцифровке топографической карты 2001 г., можно отметить неравномерное изменение лесистости на исследуемых водосборах. В целом, до 2001 г. отмечается положительная динамика прироста

лесного массива, что нельзя сказать о данных, полученных при обработке индекса NDVI – наблюдается как положительная, так и отрицательная динамика в степени залесенности водосборов. В северной части области убыль леса на ряде водосборов составляет от 10 до 40%.

Предполагаемые причины этого, кроме погрешностей, могут быть связаны с вырубкой леса в данных районах (Приложение 3). На водосборах центральной части территории динамика преимущественно положительная в размере до 30%, что возможно связано с выводом земель с сельскохозяйственного использования и зарастанием.

3. Кривые продолжительности стояния суточных слоев стока

3.1 Построение кривых и их практическое применение

Определение расчетного внутригодового распределения суточного речного стока воды внутри года или характерного его периода, независимо от хронологического хода стока, производится путем построения кривых продолжительности стояния суточных расходов воды.

Могут использоваться следующие виды кривых:

- а) средняя многолетняя годовая кривая продолжительности суточных расходов воды, дающая характеристику среднего многолетнего типового распределения суточных расходов воды;
- б) средняя многолетняя кривая продолжительности суточных расходов воды за тот или иной расчетный период года (навигационный, лесосплавной, вегетационный и т.д.).

Выбор той или иной из указанных кривых определяется характером решаемой практической задачи. Указанные кривые продолжительности суточных расходов воды строятся следующим образом:

- а). Средняя многолетняя годовая кривая продолжительности суточных расходов воды определяется путем осреднения ординат ежегодных кривых среднесуточных расходов 32 воды 30, 90, 180, 270 и 355 суточной продолжительности (или соответствующих относительных продолжительностей стояния, равных 8, 25, 50, 75 и 97 % общей длительности года) и абсолютных (срочных) значений максимального и минимального расходов воды за конкретные годы наблюдений. Аналогичным образом строится средняя многолетняя кривая продолжительности стояния среднесуточных расходов воды за тот или иной расчетный внутригодовой период. Ее ординаты могут выражаться в долях от среднемноголетнего расхода воды за рассматриваемый период (вегетационный, навигационный и т. д.), а абсциссы - в долях от его длительности.

б). Ежегодная кривая продолжительности суточных расходов воды строится на основе ранжированных в убывающем порядке суточных расходов воды конкретного года. Этим ранжированным значениям присваиваются порядковые номера с первого по 365-й или 366-ой. При этом в качестве расходов воды продолжительностью стояния 1 сутки и 365 (или 366) суток используются данные соответственно о максимальном и минимальном срочном (а не среднесуточном) расходе воды. По построенной кривой или непосредственно по данным о суточных расходах воды, соответствующих заданной проектной продолжительности их стояния, определяется искомое значение расхода воды.

Кривая продолжительности суточных расходов воды для расчетной части конкретного года (вегетационного, навигационного, лесосплавного периода и т. д.) строится аналогичным образом по данным о ранжированных в убывающем порядке среднесуточных расходах воды и их порядковых номерах. Эти порядковые номера могут быть заменены их относительными характеристиками, выраженными в долях или в % от общего числа в расчетном периоде. Выбор указанных расчетных внутригодовых периодов (вегетационный и т.д.) производится в многолетнем разрезе на основе ведомственных инструкций с учетом целей проектирования и особенностей изучаемого объекта [20].

1. Массив данных (например, значение расходов воды в реке Q) упорядочивается по убыванию и нумеруется от 1 до N , где N – общее число измерений.

2. Пусть $Q_1, Q_2, \dots, Q_N$ – уже упорядоченный массив, т.е. $Q_1 \geq Q_2 \geq \dots \geq Q_N$. Если в этом массиве подряд идут несколько одинаковых значений, $Q_i = Q_{i+1} = \dots = Q_{i+n}$, то они заменяются одним значением с наибольшим номером $i+n$. В результате формируется новый массив, строго упорядоченный по возрастанию (без одинаковых членов).

3. Множество номеров j вновь сформированного массива нормируется на число измерений N . Отношение j/N представляет собой оценку вероятности того, что расход воды не превысит значения Q_j [19]

3.2 Исходные данные: ежедневные расходы воды рек

Для построения кривых продолжительности стояния ежедневных слоев стока был создан архив данных ежедневных расходов воды по 11 водосборам. Данные были взяты за период с 1955 по 2015 год. Однако, не для всех водосборов были данные за весь указанный промежуток.

Таблица 3.1 – Ежедневные расходы воды (фрагмент)

Дата	Ежедневные расходы воды, Q м ³ /с			
	р.Кудеб - д.Свериково	р.Плюсса - с.Плюсса	р.Ситня - д.Пески	р.Лада - д.Рушляки
01.01.1986	2,03	5,33	3,47	0,3
02.01.1986	2,03	5,25	3,12	0,28
03.01.1986	2,03	5,15	3,06	0,27
04.01.1986	2,03	5,15	3,11	0,25
05.01.1986	2,03	4,86	2,9	0,24
06.01.1986	2,03	4,11	2,85	0,23
07.01.1986	2,03	3,92	2,81	0,23
08.01.1986	1,95	3,92	2,85	0,21
09.01.1986	1,95	3,92	2,9	0,21
10.01.1986	1,95	3,74	2,94	0,2
11.01.1986	1,99	3,66	2,99	0,2
12.01.1986	2,03	3,57	2,89	0,2
13.01.1986	2,07	3,57	2,94	0,19
14.01.1986	2,11	3,57	2,94	0,2
15.01.1986	2,11	3,57	2,94	0,2
16.01.1986	2,2	3,57	2,94	0,2
17.01.1986	2,18	3,57	2,98	0,2
18.01.1986	2,18	3,57	2,98	0,21
19.01.1986	2,27	3,57	2,94	0,21
20.01.1986	2,27	3,57	2,89	0,21
21.01.1986	2,24	3,53	2,85	0,25
22.01.1986	2,3	3,53	2,9	0,3
23.01.1986	2,45	3,58	3,04	0,31
24.01.1986	2,6	4,35	2,99	0,34
25.01.1986	2,69	4,17	2,94	0,36
26.01.1986	2,84	4,39	3,11	0,39
27.01.1986	2,89	4,5	3,27	0,39
28.01.1986	2,92	5,05	3,47	0,41
...	...	...	...	...
26.12.2015	1,95	6,44	3,84	-

27.12.2015	2,34	6,31	3,93	-
28.12.2015	2,94	5,6	3,06	-
29.12.2015	3,57	4,04	2,39	-
30.12.2015	3,38	3,35	2,41	-
31.12.2015	3,19	3,1	2,48	-

Таблица 3.2 – Ежедневные расходы воды (фрагмент 2)

Ежедневные расходы воды, Q м³/с						
р.Яня - д.Лавын ь	р.Вяда - д.Латышев о	р.Исса - д.Визг и	р.Льста - д.Глазатов о	р.Полонк а - д.Новые Буриги	р.Руя - д.Малы е Рожки	р.Черная - д.Большо е Захонье
1,93	1,04	2,07	0,28	0,024	0,9	0,66
2,02	1,07	1,97	0,28	0,024	0,93	0,75
1,99	1,02	1,97	0,28	0,022	0,93	0,85
1,99	1,05	1,97	0,28	0,022	0,95	0,94
1,96	1,12	1,97	0,28	0,025	0,93	0,93
1,89	1,13	1,87	0,28	0,025	0,95	0,92
1,92	1,06	1,85	0,28	0,02	0,94	0,88
1,85	1,03	1,75	0,25	0,02	0,94	0,84
1,85	1,06	1,75	0,3	0,02	0,92	0,8
1,77	1,01	1,7	0,25	0,02	0,92	0,76
1,74	1,01	1,65	0,25	0,02	0,9	0,72
1,81	1,01	1,59	0,26	0,02	0,9	0,7
1,88	1,01	1,54	0,26	0,02	0,91	0,68
1,88	1,01	1,59	0,22	0,02	0,92	0,71
1,85	0,99	1,54	0,21	0,019	0,87	0,74
1,85	1,02	1,62	0,2	0,019	0,85	0,78
1,88	0,99	1,59	0,19	0,017	0,81	0,85
1,88	1,02	1,59	0,17	0,019	0,82	0,86
1,88	1,02	1,62	0,15	0,019	0,82	0,89
1,88	0,96	1,62	0,15	0,017	0,8	0,93
1,84	0,96	1,62	0,17	0,015	0,8	0,77
1,64	0,9	1,62	0,17	0,015	0,8	0,57
1,47	0,85	1,65	0,17	0,015	0,78	0,43
1,26	0,77	1,65	0,19	0,017	0,8	0,48

1,18	0,69	1,65	0,19	0,016	0,82	0,5
1,18	0,69	1,65	0,17	0,16	0,8	0,51
1,18	0,64	1,7	0,17	0,16	0,83	0,51
1,18	0,64	1,7	0,17	0,018	0,83	0,44
...	...	...	...	...	...	...
3,15	4,34	3,86	0,4	0,58	1,64	-
3,15	4,25	3,76	0,4	0,54	1,64	-
2,93	4,25	3,7	0,4	0,49	1,64	-
2,93	4,17	3,54	0,4	0,46	1,57	-
2,9	4,17	3,54	0,41	0,45	1,54	-
2,86	4,09	3,54	0,41	0,42	1,5	-
2,84	4,01	3,43	0,41	0,42	1,48	-
2,81	3,85	3,43	0,41	0,39	1,48	-
2,77	3,69	3,43	0,38	0,39	1,48	-
2,74	3,61	3,43	0,41	0,34	1,45	-

3.3 Кривые продолжительности стояния суточных слоев стока для исследуемых объектов

По полученным данным ежедневных расходов был произведен расчет слоев стока по формуле 3.1 и построены кривые продолжительности стояния суточных слоев стока:

$$h = \frac{1000 \cdot W}{F} = \frac{864000 \cdot \bar{Q}}{F}, \quad (3.1)$$

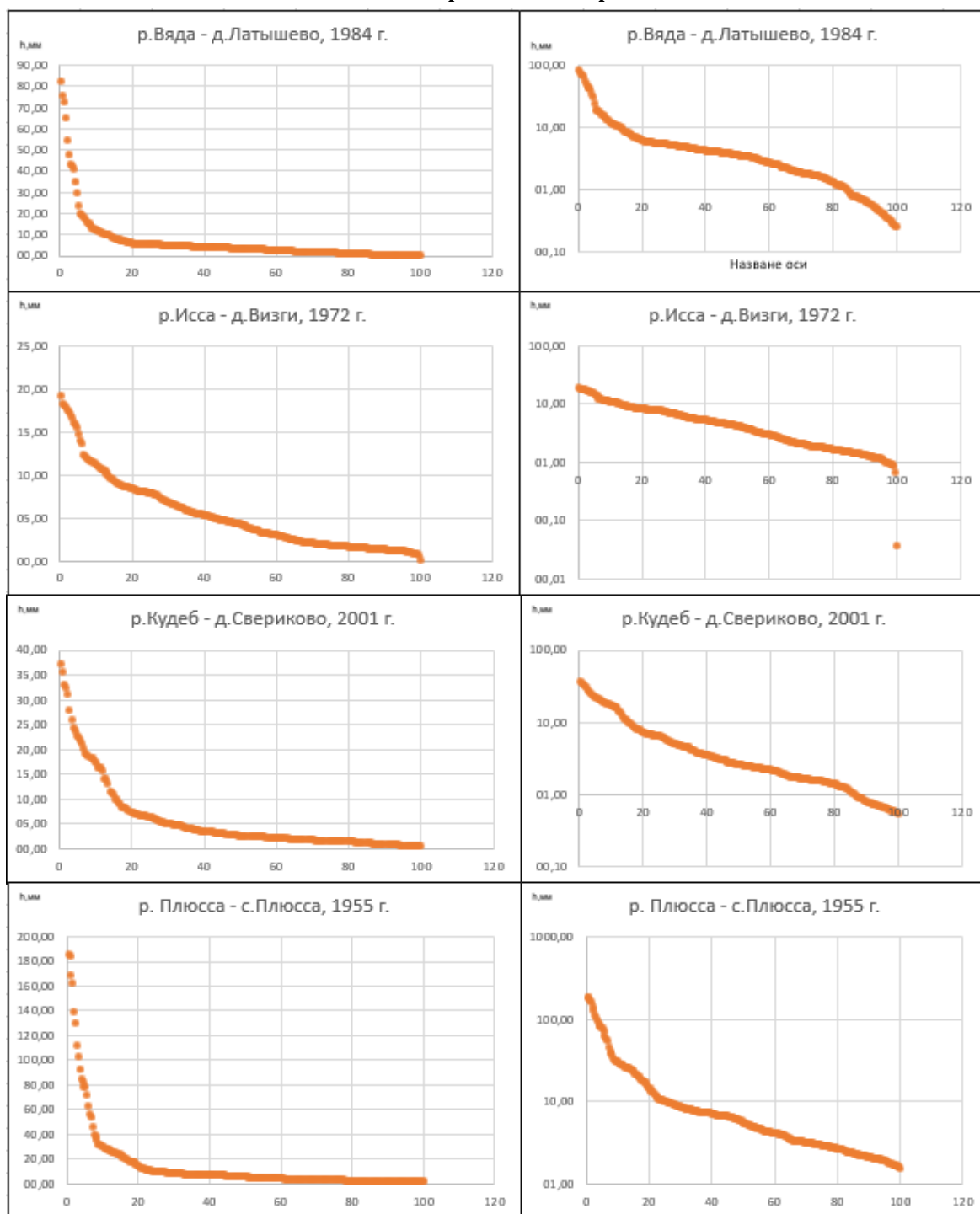


Рисунок 3.1 – Кривые продолжительности стояния суточных слоев стока для исследуемых объектов (пример)

3.4 Анализ результатов

Для оценки изменения кривых продолжительности стояния суточных слоев стока за рассматриваемый период был рассчитан наклон кривой по формуле 3.2 и построен график изменения наклона кривых продолжительности ежедневных слоев стока (рис 3.2):

$$I = (\ln Q_{33\%} - \ln Q_{66\%}) / (0,66 - 0,33), \quad (3.2)$$

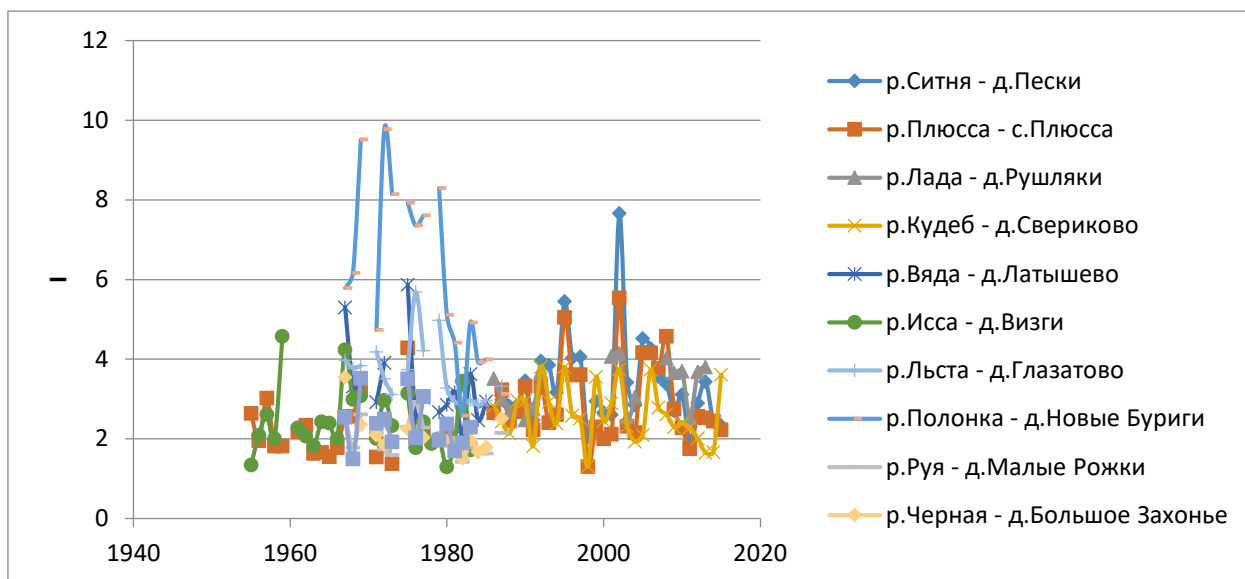


Рисунок 3.2 – График изменения наклона кривых продолжительности стояния ежедневных слоев стока

Рассмотрим график уклона кривых отдельно для водосборов северной (рис. 3.3) и центральной части Псковской области (рис 3.4).

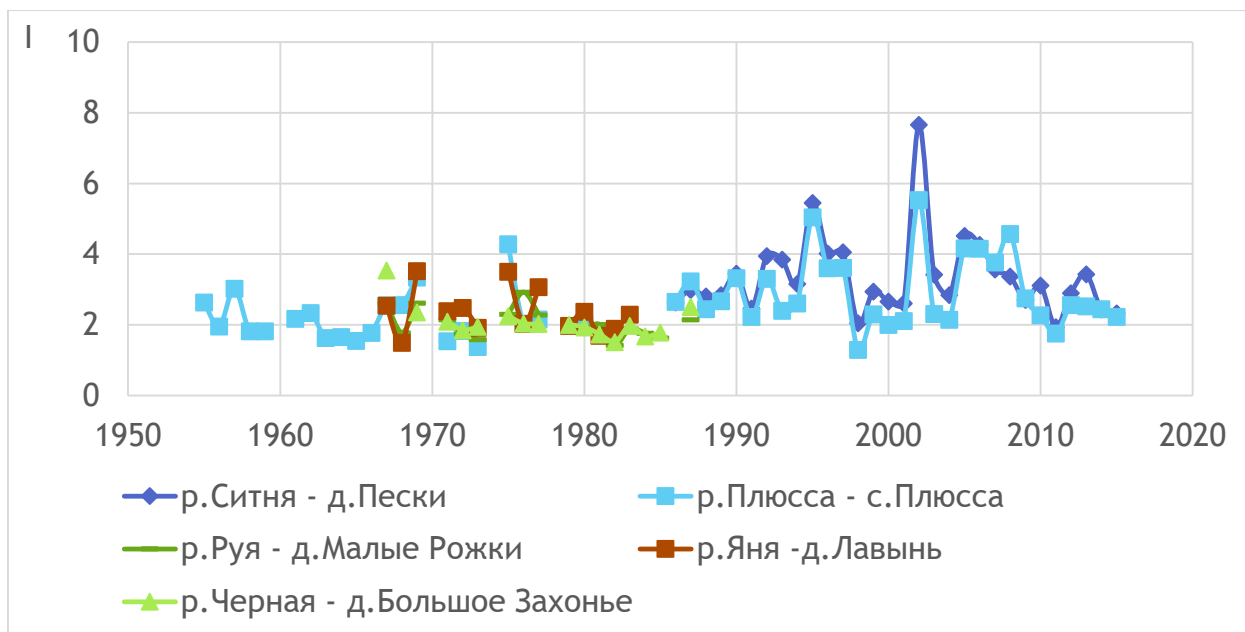


Рисунок 3.3 – График изменения наклона кривых продолжительности стояния ежедневных слоев стока для северной части территории Псковской области

На графике можем отметить скачки уклона с 1990 по 2010 год. Что свидетельствует о наличии изменений, произошедших на водосборе за этот период.

Рассмотрим детальней на примере водосбора реки Плюсса, поскольку имеем больше всего данных по данному водосбору. В левой части графика (рис 3.3) значения уклона колеблются в одном диапазоне, ближе к 1990-м годам количество леса растет и значение уклона начинает расти, то есть можем отметить тренд на повышение. Если тренд идет на повышение уклона – это может коррелировать с уменьшением лесистости на водосборе. Если смотреть на значения в 2010 году – можем обратить внимание, что значения близки к тому, что мы видели в 60-70 годы. И это коррелирует с данными по лесистости, полученными по индексу NDVI и по справочным данным ОГХ (табл. 3.3).

Таблица 3.3. Лесистость водосбора р. Плюсса – с. Плюсса

Водосбор	Лесистость, %		
	ОГХ (1966 г.)	Карта (2001 г.)	NDVI (2017-2018 г.)
р. Плюсса – с. Плюсса	52	80	59

На рисунке 3.4 представлены графики кривых продолжительности стояния ежедневных слоев стока для водосбора Плюсы. По графику за 1997 год можем отметить очень плавный ход изменения стока. Максимумы не такие высокие, переходы плавные – вода отдается медленно и не так интенсивно.

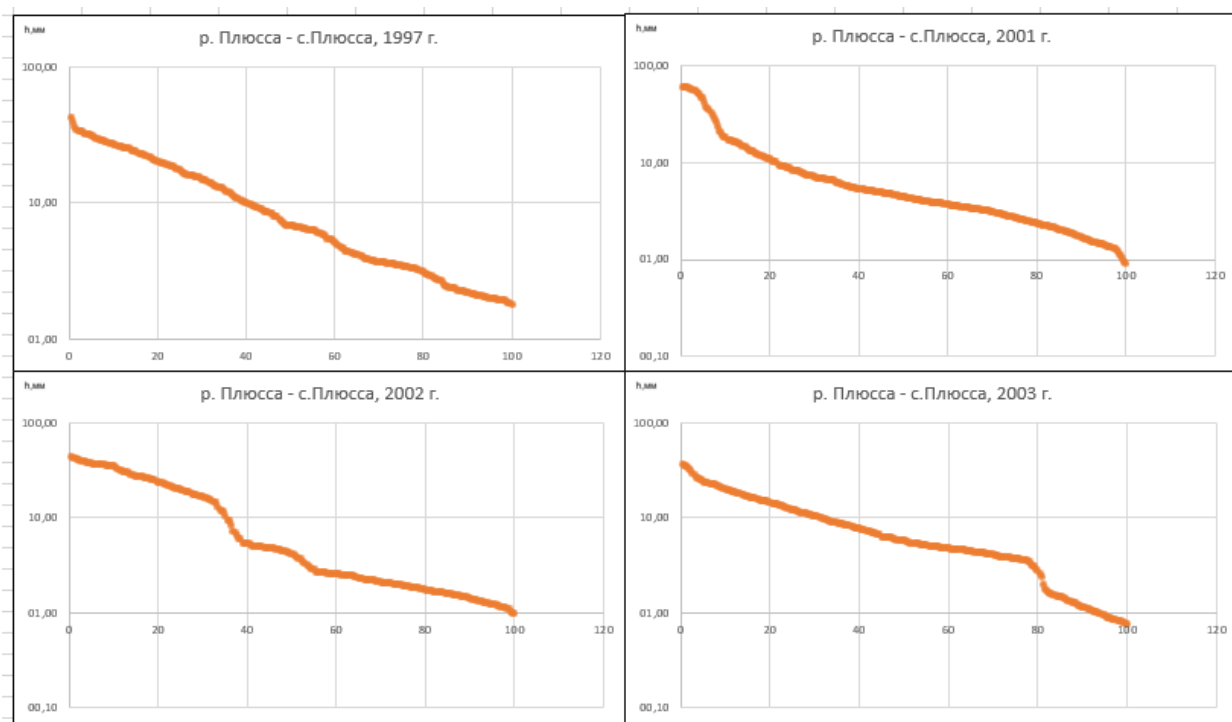


Рисунок 3.4 – Кривые продолжительности стояния суточных слоев стока для р. Плюсса – с. Плюсса

На графике 2001 года видим скачок максимального стока, в то время как минимальные уровни поднимаются (грунтовый сток, меньше испарения на водосборе, больше воды поступает в реку). На графиках с 2001 по 2003 год видим волну взаимодействий, началась в 2001 году, дальше пошла в середину

– 2002 год, далее водосбор реагирует на уровни малых расходов – 2003 год. По полученным графикам можем сделать вывод, что произошло какое-то изменение на водосборе, которое отражалось постепенно на стоке в течении 4-5 лет. Сложно точно интерпретировать с чем могут быть связаны такие изменения, поскольку у нас нет точных данных о климате. Однако, мы можем сказать, что такое изменение вполне может быть связано с изменением лесистости, что подкрепляют данные по оценке лесистости (табл. 3.3).

Рассмотрим водосборы центральной части территории (рис. 3.4). По графику уклона кривых можем сделать вывод, что высокие значения уклона наблюдаются до 1980-го года, после 1980-го года колебания уклона снижаются.

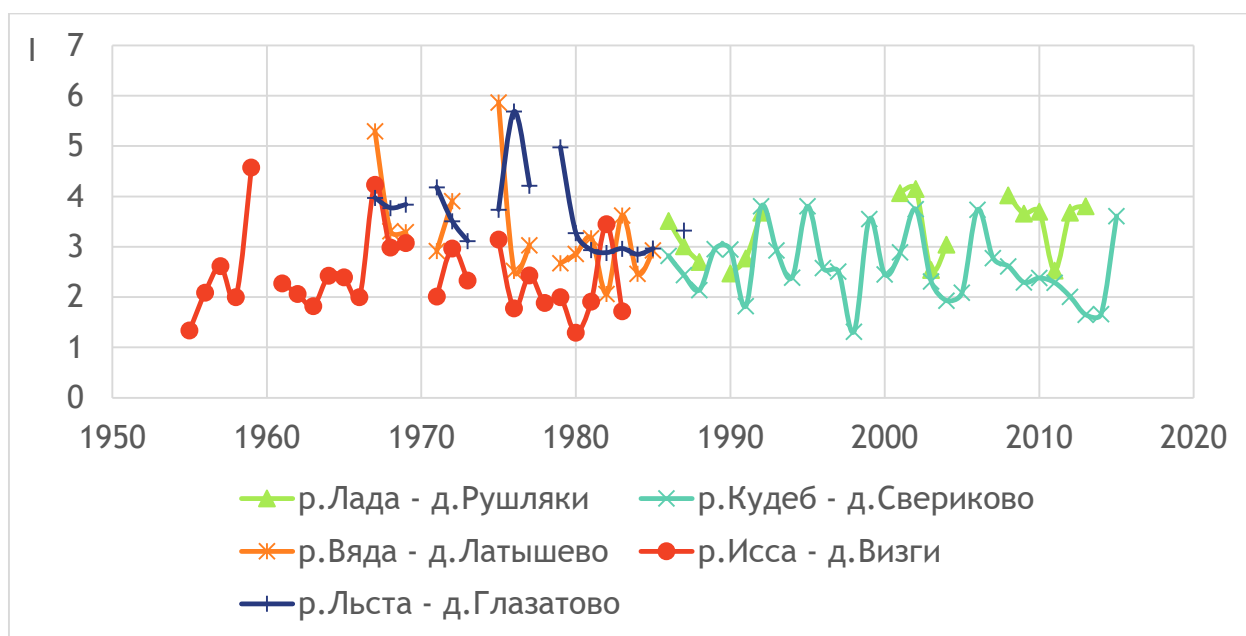


Рисунок 3.5 – График изменения наклона кривых продолжительности стояния ежедневных слоев стока для центральной территории Псковской области

Таблица 3.4 – Лесистость водосборов центральной части Псковской области

Водосбор	Лесистость, %		
	ОГХ (1966 г.)	Карта (2001 г.)	NDVI (2017-2018 г.)
р. Льста – д. Глазатово	49	83	88
р. Лада – д. Рушляки	26	38	67
р. Лиственка – д. Красики	32	59	62
р. Полонка – д. Новые Буриги	37	63	88
р. Кухва – д. Кахново	18	32	47
р. Вяда – д. Латышево	40	58	58
р. Исса – д. Визги	53	52	65

Анализируя графики и данные о лесистости водосборов (рис. 3.5, табл. 3.4) можем так же сделать вывод, что в центральной части Псковской области не проводилось интенсивных вырубок, площадь лесного покрова увеличивалась к 2020 году, не было резких скачков уклона кривых.

Заключение

Цель исследования выпускной квалификационной работы достигнута – произведена оценка влияния изменения лесистости водосборов на сток по данным о ежедневных расходах воды.

Несмотря на сложность в интерпретации данных, недостатке данных по расходам воды и невозможности точно анализировать влияние изменения климата на сток малых водосборов, можно проследить некоторые взаимосвязи изменения лесистости и их реакции на сток.

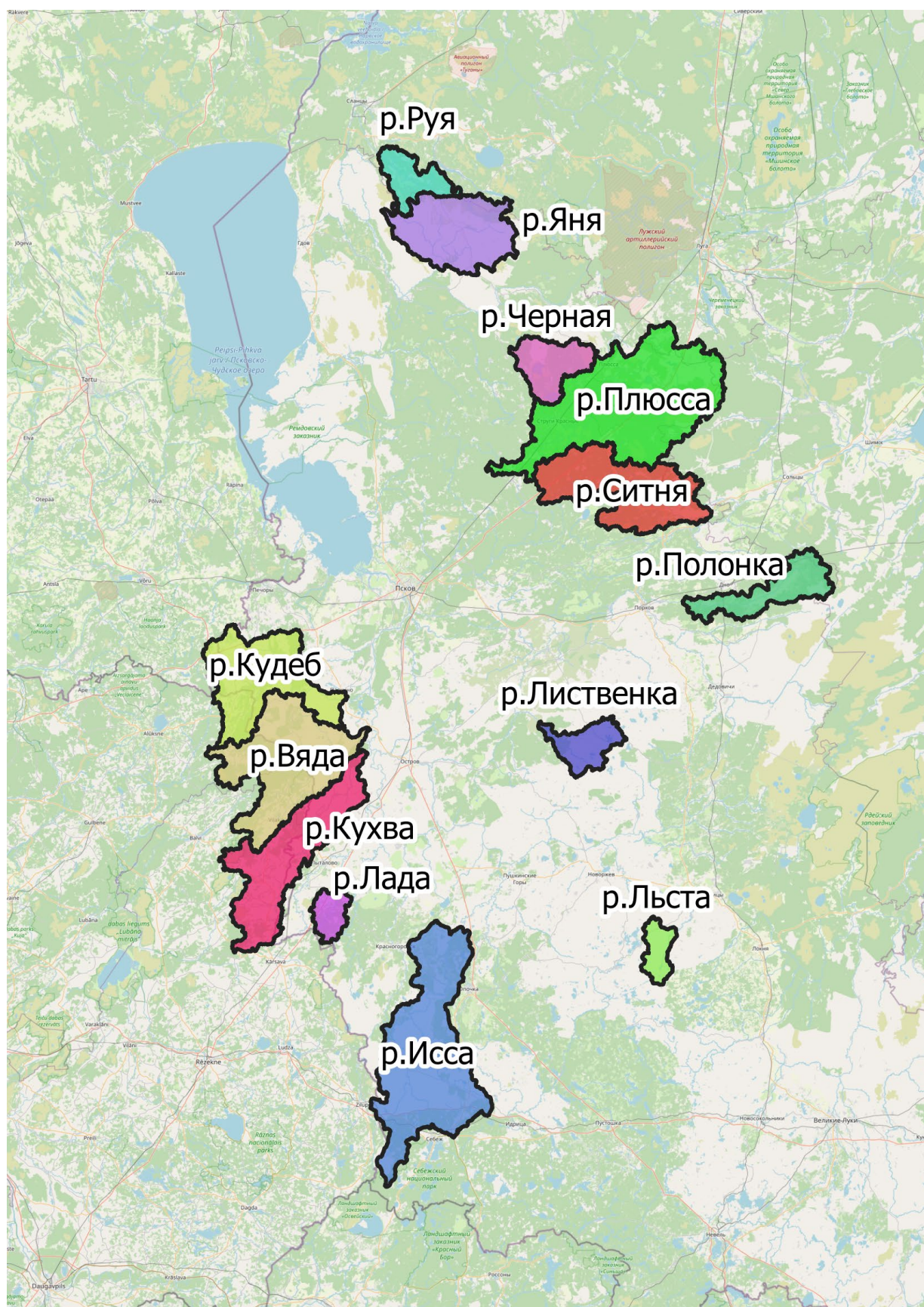
Список использованной литературы

1. АИС ГМВО. – Режим доступа: <https://gmvo.skniivh.ru> – Дата доступа: 04.09.2021
2. U.S. Geological Survey [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.usgs.gov> – Date of access: 21.10.2021
3. Побединский А. В., Бобруйко Б. И. Влияние сплошных рубок на сток рек. — Лесное хозяйство, 1972, № 2, с. 26—31
4. Муратов М. Э. Изменение гидрологического режима рек под влиянием сплошных рубок на Южном Урале. – Пушкино. 1973, с. 118— 132.
5. Федоров С. Ф., Марунич С. В. Гидрологическая роль леса. - СПб: Любавич, 2018. – 176 с
6. Гидрологическая роль лесных геосистем. – Новосибирск: Наука Сибирское отделение. 1989, с. 1—27
7. Крестовский О. И. Влияние вырубок и восстановления лесов на водность рек. – Ленинград: Гидрометеиздат. 1986. 119 с
8. L.W. Swift JR, W. T. Swank Long term responses of streamflow following clearcutting and regrowth, 1981
9. Псковская область. Большая российская энциклопедия. – Режим доступа: <https://bigenc.ru/geography/text/3171840> – Дата доступа: 14.08.2021
10. Природные ресурсы. Официальный портал государственных органов Псковской области. Режим доступа: <http://www.pskov.ru/region/resursy> – Дата доступа: 14.08.2021
11. Псковская область. Большое Золотое Кольцо России. – Режим доступа: <http://bigring.ru/?trID=349> – Дата доступа: 14.08.2021
12. Изображение Земли из космоса: Примеры применения [Текст]. Научно-популярное издание – М.: Инженерно-технологический центр «СканЭкс», 2005. – 100с.
13. О применении спутниковых данных для гидрологических целей [Текст] / Усачев В. Ф., Прокачева В.Г. – СПб.: ГГИ – 7с.

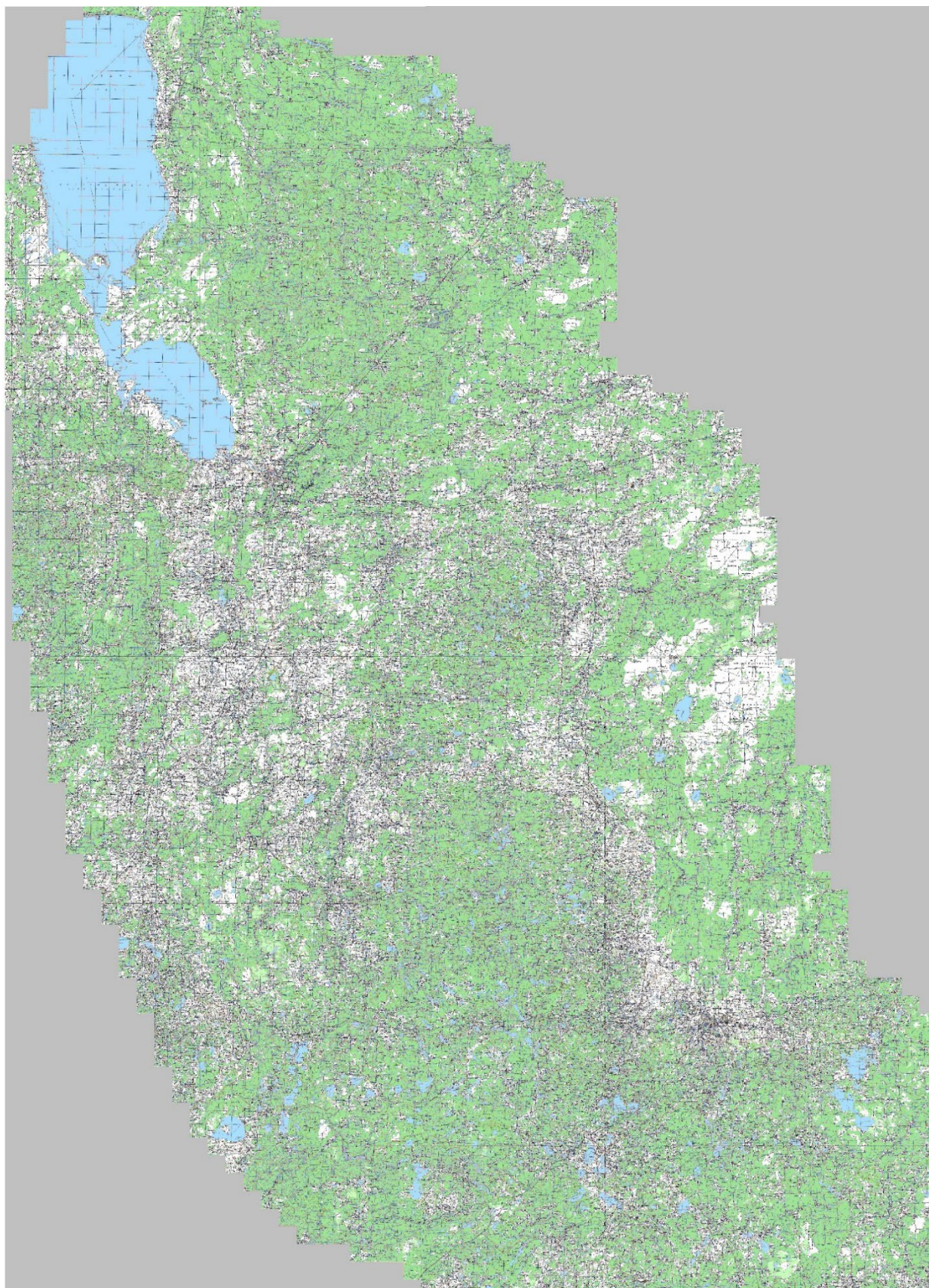
14. Спутник «Sentinel-2». – Режим доступа: http://mapexpert.com.ua/index_ru.php?id=152&table=news – Дата доступа: 16.09.2021.
15. Продукты «Sentinel-2». – Режим доступа: <https://gdal.org/drivers/raster/sentinel2.html> – Дата доступа 08.10.2021.
16. NDVI - теория и практика. – Режим доступа: <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html> – Дата доступа: 16.09.2021
17. Sentinel-2 MSI Technical Guide [Electronic resource]. – Mode of access: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-2a/algorithm> – Date of access: 22.09.2021
18. Геопортал использование лесов ФГБУ «Рослесинфорг» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://geo.roslesinforg.ru:8282/#/> – Дата доступа: 23.10.2021
19. Нелинейная динамика экологических и гидрологических процессов [Текст] / Долгоносков Б.М. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. — 440 с.
20. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений [Текст] / ФГБУ «ГГИ», 2005. — 123 с.
21. ESA Land Cover Map [Electronic resource]. – Mode of access: <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.php> – Date of access: 26.11.2021
22. Land Cover CCI Product User Guide Version 2.0 [Electronic resource]. – Mode of access: http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download/ESACCI-LC-Ph2-PUGv2_2.0.pdf – Date of access: 26.11.2021
23. WorldCover Product User Manual [Electronic resource]. – Mode of access: https://worldcover2020.esa.int/data/docs/WorldCover_PUM_V1.1.pdf – Date of access: 26.11.2021
24. Подробная топографическая карта Псковской области [Карты]. – Режим доступа: http://www.etomesto.ru/map-pskov_topographic-map/ – Дата доступа: 21.11.2019.

Приложения

Приложение 1. Исследуемые водосборы рек Псковской области.



Приложение 2. Топографическая карта Псковской области.



Масштаб 1 : 50 000
(в 1 см – 0,5 км)

Приложение 3. Районы заготовки древесины Псковской области.

