



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

Кафедра водно-технических изысканий

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(магистерская диссертация)

На тему **Прогнозирование изменения  
излучин на реке Луга**

Исполнитель Ломов Геннадий Михайлович  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель Профессор, доктор географических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Соколова Александра Александровна  
(фамилия, имя, отчество)

**«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой**

(подпись)

Кандидат географических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич  
(фамилия, имя, отчество)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Санкт-Петербург  
2025

## Оглавление

	Введение.....	3
2	Физико-географическое описание реки Луга.....	6
2.1	Общая характеристика реки Луга.....	6
2.2	Геологическое строение и рельеф.....	10
2.3	Климатические условия.....	16
2.4	Гидрологические характеристики.....	20
2.5	Растительность.....	22
3	Теоретические основы формирования и изменений излучин.....	26
3.1	Причины и механизм образования излучин.....	26
3.2	Условия формирования излучин.....	28
3.3	Влияние внешних факторов на развитие излучин.....	31
4	Методы исследования изменений излучин реки.....	40
5	Дистанционные методы и ГИС-анализ.....	45
6	Гидроморфологические и геофизические исследования.....	47
7	Математическое и экспериментальное моделирование.....	50
8	Динамика русловых процессов на основе исторических данных.....	53
9	Теоретические основы гидравлического моделирования в HEC-RAS.....	61
10	Подготовка исходных данных и построение расчётной модели в HEC-RAS.....	64
	Заключение.....	78
	Список использованных источников.....	80

## Введение

Актуальность. Речные излуины формируют особый тип руслово-пойменного комплекса, отличающийся своеобразным гидрологическим режимом, который способствует развитию уникальной растительности и оказывает значительное влияние на природную среду и хозяйственную деятельность человека. Конфигурация русла определяет зоны возможного затопления при экстремальных паводках и половодьях, а сами руслово-пойменные процессы напрямую влияют на использование и освоение прилегающих территорий.

Гидрологические процессы в речных системах представляют собой результат сложного взаимодействия множества факторов, включая гидродинамические, геоморфологические и климатические. Одним из ключевых явлений в этом контексте является меандрообразование — естественное изменение формы русла за счёт его изгибов. Динамика меандров влияет на устойчивость берегов, перераспределение наносов, развитие экосистем, а также на функционирование инженерных сооружений. В этой связи исследование закономерностей формирования и эволюции излуин является актуальной научной и практической задачей.

Река Луга, протекающая по территории Ленинградской и Новгородской областей, представляет собой характерный пример водотока, подверженного активной меандровой перестройке. Её гидрологический режим определяется сезонными колебаниями, связанными с паводками, ледоходами и изменениями водного баланса. Проведение гидрометрических наблюдений на затопляемых поймах зачастую представляет значительную трудность, поскольку даже современные измерительные средства (например, профилографы) не всегда обеспечивают необходимую точность. Это обуславливает необходимость

применения косвенных методов, в частности — математического моделирования.

Со временем излучины могут углубляться, мигрировать, разрушаться или формировать новые русловые конфигурации. Такие изменения затрагивают локальные гидрологические и экологические условия, а также влияют на хозяйственную деятельность в регионе. Учитывать эти процессы крайне важно при проектировании и эксплуатации гидротехнических сооружений, строительстве мостов, автодорог, а также при планировании природоохранных мероприятий.

Прогнозирование изменений русловой формы на реке Луге приобретает особую значимость в связи с необходимостью оценки рисков, связанных с эрозией берегов, затоплением сельскохозяйственных угодий, нарушением функционирования инфраструктуры и изменениями речной морфологии. Современные методы прогнозирования включают математическое моделирование, применение геоинформационных систем (ГИС), дистанционного зондирования Земли, а также лабораторное моделирование русловых процессов. Комплексный подход к анализу динамики меандров позволяет более точно оценивать темпы и направления русловых изменений, что важно для эффективного гидрологического мониторинга и рационального управления водными ресурсами.

Данная магистерская работа посвящена исследованию процессов изменения излучин реки Луги и разработке методов их прогнозирования. Основной целью исследования является выявление ключевых факторов, влияющих на динамику меандров, анализ закономерностей их трансформации и применение современных расчётных подходов для прогнозирования будущих изменений русла. В работе использованы данные полевых наблюдений, архивные материалы, математическое моделирование и методы дистанционного зондирования. Полученные результаты могут быть востребованы в области гидрологии, природопользования, территориального планирования, а также в работе

органов местного самоуправления, занимающихся вопросами управления водным хозяйством и охраной окружающей среды.

Цель работы — получение полей скоростей течения в русле и на пойме на основе цифровой модели рельефа и плановой гидрологической модели, реализованной в программном комплексе HEC-RAS, на примере одного из русловых участков реки Лути.

## 2 Физико-географическое описание реки Луга

### 2.1 Общая характеристика реки Луга

Река Луга — одна из характерных водных артерий северо-западной части кустарником берегами. По мере продвижения на северо-запад её русло становится шире, течение — спокойнее, и река приобретает черты равнинной. Река протекает по территориям Новгородской и Ленинградской областей, пересекает такие города и населённые пункты, как Луга, Кингисепп, и, наконец, впадает в Лужскую губу Финского залива. Площадь водосборного бассейна Луги составляет около 13 200 квадратных километров, что делает её крупнейшей рекой западной части Ленинградской области. Средняя скорость течения в верховьях составляет около 0,5–0,8 м/с, в среднем течении — до 1 м/с. Весной, во время паводка, Луга выходит из берегов, затопляя прибрежные поймы, образуя временные водно-болотные угодья. Замерзает река в ноябре–декабре, вскрывается в апреле.

Глубина реки колеблется от 1–1,5 м в верховьях до 4–5 метров в нижнем течении, у города Кингисеппа. Ширина русла — от 10 до 70 метров, достигая на отдельных участках (особенно ближе к устью) до 100 метров.

История Луги уходит вглубь веков. Уже в I тысячелетии нашей эры на её берегах существовали поселения финно-угорских и балтийских племён. Позднее сюда пришли славяне — ильменские словене. Их поселения часто располагались на высоких берегах, откуда удобно было следить за рекой и защищать дома. Её путь начинается в Новгородской области и заканчивается в водах Финского залива Балтийского моря. Несмотря на сравнительно небольшую длину — около 353 километров, — река играет важную роль в природной, исторической и социальной жизни региона. Луга берёт начало из небольшого болота у деревни Поддубье в

Батецком районе Новгородской области. В верховьях она представляет собой типичную лесную малую реку: узкую, извилистую.

Луга не была частью основного пути «из варяг в греки», но служила важным вспомогательным маршрутом, соединяющим внутренние районы Новгородской земли с Балтикой. По реке перевозили рыбу, меха, воск, мёд — товары, которыми славилась северная Русь. Торговля и обмен происходили в устьевой части, в районе современного Кингисеппа и Нарвы [6].

С X века земли по течению Луги входили в состав Новгородской республики, и река стала внутренней водной артерией этого самостоятельного политического образования. В средние века её берега служили как местом для пашен и деревень, так и границей с враждебными землями — шведскими и немецкими владениями. С XVI–XVII века, с усилением Московского государства, регион приобретает всё большее оборонительное значение.

Во время Великой Отечественной войны река снова оказалась в центре событий: в 1941 году по её берегам проходила знаменитая Лужская оборонительная линия, которая на протяжении нескольких недель сдерживала наступление немецких войск на Ленинград. Болотистая местность, поросшие лесом берега и излучины реки помогли советским войскам выстроить эффективную систему обороны, замедлив продвижение врага.

Река Луга является одной из крупнейших гидрографических единиц юго-западной части Ленинградской области. Ее русло проходит по территориям Волосовского, Лужского и Кингисеппского районов Ленинградской области, а также Батецкого и Новгородского районов Новгородской области. Река Луга берет начало в Тёсовских болота, высота над уровнем моря 53 м, впадает в Лужскую губу Финского залива Балтийского моря (вблизи поселка Усть-Луга) - 0 м.

Согласно данным государственного водного реестра России, река Луга входит в Балтийский бассейновый округ, ее водохозяйственный участок определяется как самостоятельный, без выделенного подбассейна. Общая протяженность реки составляет 353 , из них 267 км приходится на Ленинградскую область, а площадь водосборного бассейна достигает 13,2 тыс. км<sup>2</sup>. Несмотря на свои сравнительно скромные размеры, Луга играет значимую роль в поддержании водного баланса региона и хозяйственной деятельности.

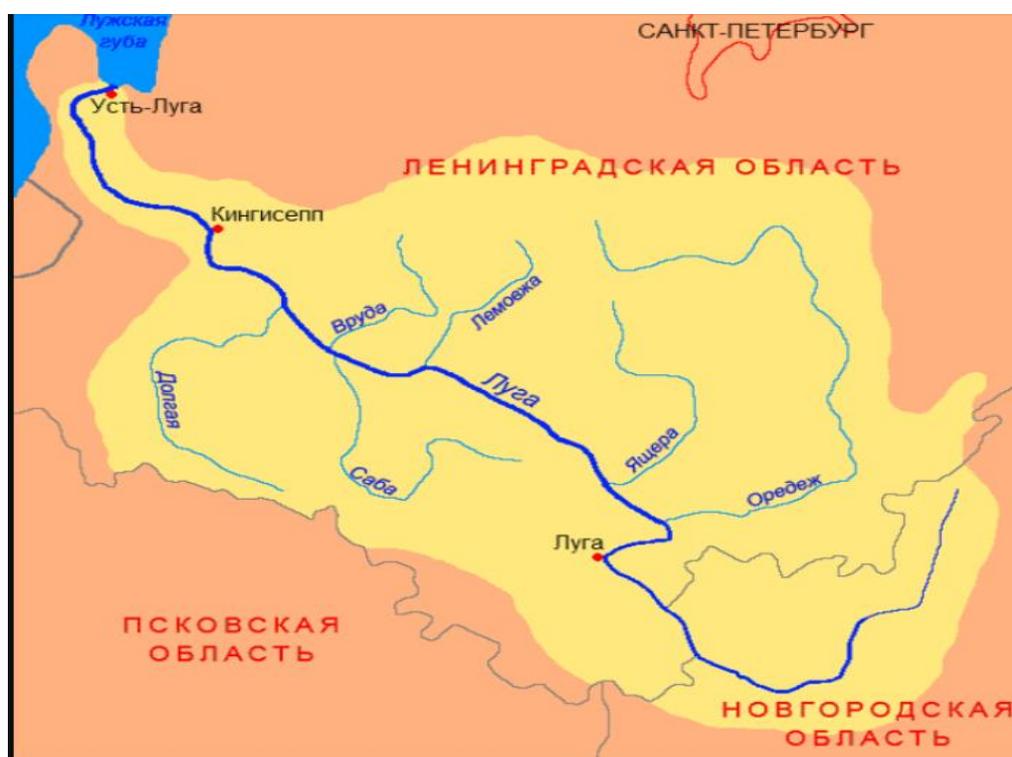


Рисунок 2.2 Карта-схема реки Луга.

Питание смешанное, с преобладанием снегового. Замерзает в начале декабря, вскрывается в начале апреля. Судоходна на отдельных участках (173 км). По берегам – хвойные и смешанные леса, в районе селений – поля. В верхнем течении Луга протекает в низких, порой заболоченных берегах. Для среднего и нижнего течения характерен холмисто-равнинный рельеф. На Луге находится Кингисеппская ГЭС. При пересечении

моренных возвышенностей и гряд образует Сабские и Кингисепские пороги.

Русловые процессы реки Луга определяются основными природными факторами – геологическим строением и рельефом, характером растительного покрова, а также климатом, обуславливающим особенности гидрологического и термического режимов реки.

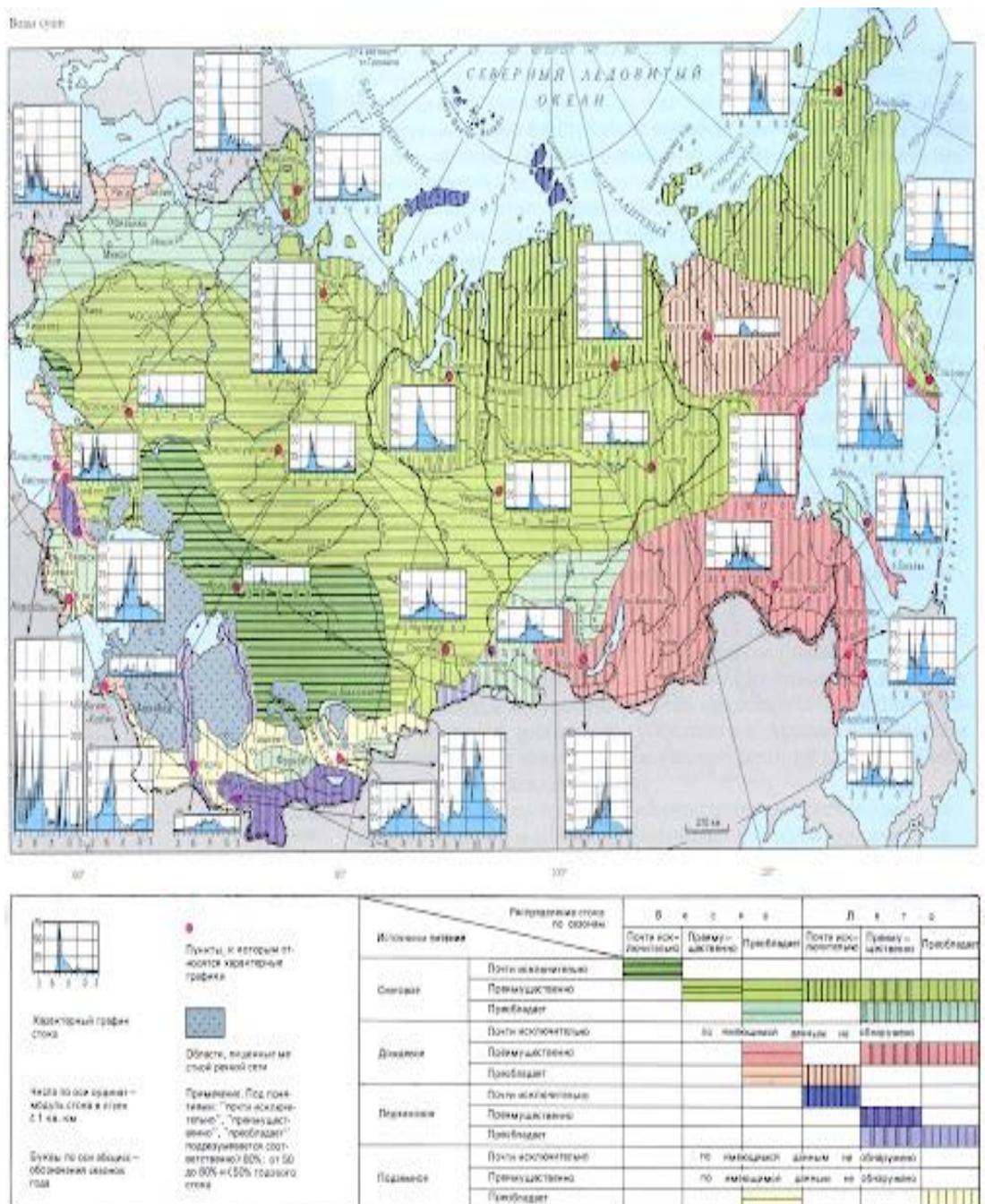


Рисунок 2.3 Типы водного режима рек СССР

## 2.2 Геологическое строение и рельеф

Долина реки Луга представляет собой результат сложных и многоступенчатых геологических процессов, разворачивавшихся на протяжении сотен миллионов лет. Её формирование связано как с глубокими тектоническими сдвигами и денудацией в рамках развития Русской платформы, так и с более поздними, интенсивными изменениями, обусловленными воздействием четвертичных оледенений, в особенности последнего — Валдайского (около 100–10 тыс. лет назад). После отступления ледникового щита на территории бассейна реки сформировались обширные толщи моренных, флювиогляциальных и аллювиальных отложений, которые легли в основу современного облика долины. Эти рыхлые образования отличаются значительным разнообразием: от плотных супесей и глин до песчано-гравийных и суглинистых разностей. Их мощность в разных участках бассейна варьируется от нескольких метров до 30–40 м.

По гидрографическому типу Луга классифицируется как равнинная река, что определяется малыми уклонами русла (в среднем 0,2–0,4 м/км), относительно спокойным течением и развитой поймой. Её длина составляет около 353 км, площадь водосборного бассейна — порядка 13,200 км<sup>2</sup>. В верховьях река имеет более узкую долину, где преобладают холмистые, моренно-зандровые формы рельефа. В среднем и нижнем течении долина расширяется, появляются широкие террасированные поймы, старичные комплексы, затоны и заводы. Русло Луги извилистое, с чередованием глубоких плёсов и мелководных перекатов, зачастую с участками быстрого течения и неравномерного профиля дна. В ряде мест русло осложнено обнажениями коренных пород, образующими пороги. Особенно они выражены в местах, где река пересекает твердые карбонатные породы Силурийского глинта.

Ключевые участки порогов:

Кингисеппские пороги — наиболее известный участок порожистого течения, где на протяжении 4 км наблюдается резкий перепад высот (до 10 м). Здесь река прорезает известняки и доломиты силурийского возраста, формируя пороги ступенчатого типа. Эти пороги делят Лугу на два судоходных участка — от села Толмачёво до порогов и от порогов до устья. Сабские и Сотронские пороги — расположены выше по течению, они связаны с выходами плотных глин и песчаников, также формирующих местные геоморфологические перегибы. Берега реки также варьируют по структуре: на равнинных участках они низкие и заболоченные, в зонах тектонических или ледниковых возвышений — обрывистые, местами до 10–15 метров высотой. Повсеместно встречаются моренные холмы, озы и камовые гряды.

Так как бассейн реки Луга расположен на территории Русской платформы, в пределах Северо-Западного региона Восточно-Европейской равнины. Основание платформы представлено кристаллическими породами архея и нижнего протерозоя, перекрытыми мощным чехлом осадочных пород.

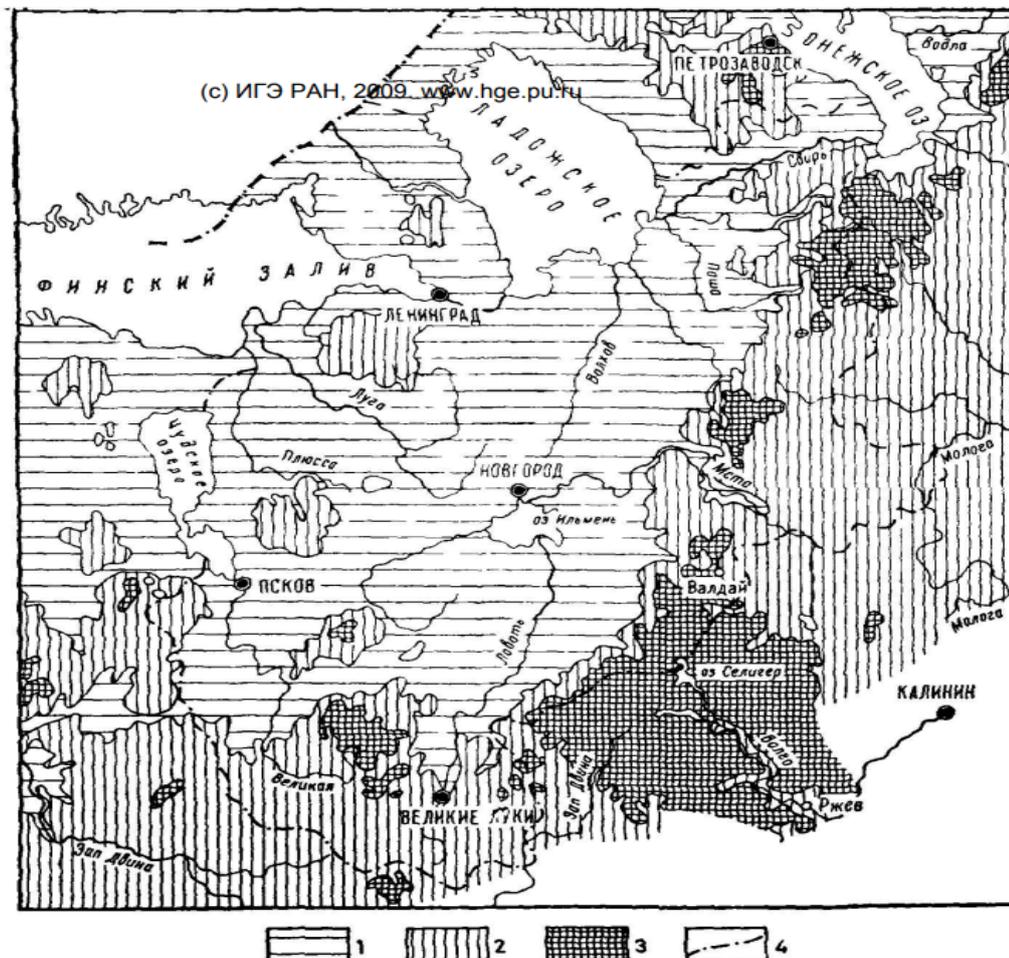


Рис. 2. Гипсометрическая карта-схема Ленинградского региона. Абсолютные высоты: 1 — 0—100; 2 — 100—200; 3 — 200—300 м; 4 — границы региона

Рисунок 2.1 Гипсометрическая карта Ленинградского региона.

Основные стратиграфические комплексы:

Кембрийские глины (синие, тугоплавкие) — залегают на значительной глубине, но нередко обнажаются в береговых обрывах. Их мощность достигает 100 м. Эти глины ценны как сырьё для керамической и строительной промышленности.

Ордовикские известняки и доломиты — формируют Силурийский глинт. Их выходы создают устойчивые формы рельефа, в том числе пороги и уступы.

Силурийские мергели и доломиты — устойчивы к эрозии, используются как природный строительный материал.

Четвертичные отложения — включают флювиогляциальные пески, морены, торфяники, озёрные и болотные осадки. Их формирование связано с деятельностью ледников и талых вод. В понижениях — особенно мощные торфяные залежи.



Рисунок 2.2.1 Геологическая карта-схема Ленинградской области.

Лужско-Плюсский ландшафт. Занимает бассейны рек Луги и Плюсы. Характеризуется сложным рельефом: здесь чередуются волнистые моренные равнины, отдельные группы моренных холмов, камовые холмы и озы. Климат мягче, чем в восточных районах: зима короче и теплее, самый холодный месяц — февраль. В естественном состоянии преобладали еловые зеленомошные леса, но сейчас они

большой частью заменены вторичными березовыми и сосновыми лесами на подзолистых почвах. В сельском хозяйстве распахан лишь около 30% территории. В прошлом данную местность покрывали широколиственно-еловые леса, которые в настоящее время практически не сохранились. В результате вырубки этих лесов на их месте сформировались вторичные березовые и осиновые леса с примесью широколиственных пород — вяза, липы, клена, дуба и лещины. Своеобразным природным участком являются Дудергофские высоты, расположенные в северо-восточной части плато. Они возвышаются на 70–80 метров над его уровнем и представляют собой моренные образования. Геологически они сложены мощной толщей валунного суглинка с включениями глыб ордовикских известняков и кембрийских глин. Растительность представлена вторичными кленово-ясеневыми лесами с подлеском из лещины. В настоящее время территория Ордовикского плато представляет собой основной сельскохозяйственный район области. Здесь развиты такие отрасли, как овощеводство, молочное животноводство и птицеводство. Кроме того, ландшафтная структура региона играет ключевую роль в производстве строительной извести [11].

Лужско-Оредежский ландшафт. Представляет собой однообразную и сильно заболоченную равнину, пересечённую в глубоких долинах реками Луга и Оредеж. Поверхность коренных пород (известняков и доломитов) разрезана древними речными долинами, частично используемыми современными реками — Лугой, Оредежем и Госной. Климат — умеренно влажный, с частой сменой воздушных масс, большим количеством циклонов и господством западных и северо-западных ветров летом, западных и юго-западных — зимой. Коренные хвойные леса на сильноподзолистых почвах почти не сохранились. Преобладают вторичные березово-осиновые леса. Распахано менее 10% территории. Основные направления хозяйственного использования — молочное животноводство, овощеводство и картофелеводство. По долинам Оредежа и Луги имеются месторождения формовочных песков, пригодных для

литейного производства, а также залежи гравия, песка и ленточных глин. Частично используется гидроэнергия рек (например, Ордеж и Вруда) — работают небольшие ГЭС.

## 2.3 Климатические условия

Климат бассейна реки Луга характеризуется как умеренно континентальный с ярко выраженными чертами переходного типа от морского к континентальному. Такая специфика климатического режима обусловлена его географическим положением на северо-западе Европейской части России, в зоне активного взаимодействия между континентальными и морскими воздушными массами. Существенное влияние оказывает Атлантический океан, откуда поступают влажные и относительно тёплые воздушные массы, формирующие нестабильную погоду с повышенной облачностью и значительным уровнем осадков, особенно в осенне-зимний период. Климатическая система региона отличается высокой влажностью воздуха, частыми осадками различной интенсивности и продолжительностью, а также длительными периодами облачной и пасмурной погоды [4]. Среднегодовое количество осадков составляет от 600 до 800 мм, при этом наибольшее их количество выпадает в летний и осенний сезоны. Такое распределение связано с активной циклонической деятельностью и сезонными особенностями атмосферной циркуляции. Средняя температура самого тёплого месяца — июля — составляет +16...+18 °С, что свидетельствует о прохладном и сравнительно коротком лете. Летние периоды характеризуются переменчивостью погоды, чередованием прохладных и тёплых дней, наличием дождливых интервалов и сравнительно невысокой суммой активных температур, что влияет на продолжительность вегетационного периода. Зимний период в бассейне реки Луга мягкий, с частыми оттепелями, нестабильным снежным покровом и резкими колебаниями температур. Средняя температура января, как самого холодного месяца, варьируется в пределах -8...-10 °С. Зима сопровождается частыми переходами температуры через ноль, что способствует образованию наледи и изменчивому состоянию

снежного покрова. Пасмурная погода преобладает, что ограничивает солнечную инсоляцию в зимние месяцы. Весна наступает поздно и отличается продолжительным переходным характером. Часто наблюдаются возвраты холодов, временное восстановление снежного покрова, что задерживает начало активной фазы таяния снега и повышает риск весеннего половодья. Такие климатические условия усложняют агротехнические мероприятия и требуют адаптации природопользования к нестабильности погодных факторов. Туманы — частое природное явление в бассейне реки Луга, особенно в период межсезонья и в холодное время года. Их формирование обусловлено сочетанием высокой влажности, слабой ветровой активности и значительных суточных колебаний температуры воздуха.

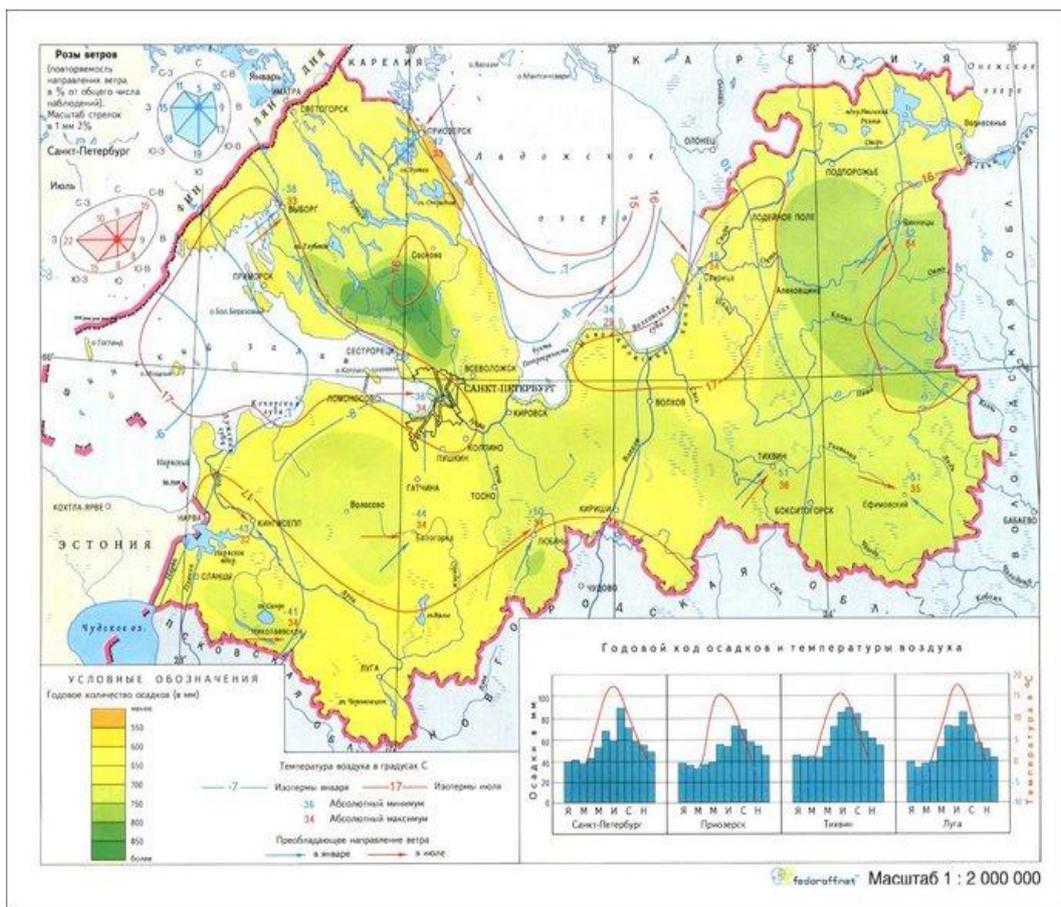


Рисунок 2.3.1 Климатическая карта Ленинградской области

Климатические условия оказывают прямое влияние на гидрологический режим реки Луга, определяя как сезонную динамику уровня воды, так и особенности стока. Весной наблюдаются высокие паводки, вызванные интенсивным снеготаянием и недостаточной инфильтрацией в мёрзлый грунт. Летом сток уменьшается, осенью снова усиливается в связи с увеличением атмосферных осадков, а зимой характерны низкие уровни воды при возможных кратковременных подъёмах в результате оттепелей и дождей. Условия бассейна реки Луга оказывают определяющее влияние на целый комплекс природных процессов, в том числе на гидрологический режим, процессы почвообразования, биоразнообразие и функционирование экосистем. Преобладание тёплых и влажных воздушных масс, поступающих с Атлантики, формирует умеренно-влажный климат с высокой циклональной активностью, способствующей неустойчивости погодных условий и частой смене синоптических ситуаций. Одним из ключевых факторов является гидротермический режим, который формирует условия для стока и подпитки водотоков [3]. Сравнительно мягкая зима с частыми оттепелями ведёт к частичному таянию снега в холодный период, формируя зимние межень-подъёмы, что является характерной особенностью речного режима для данной климатической зоны. Весеннее половодье носит ярко выраженный характер, однако его пик может значительно варьироваться в зависимости от характера таяния снежного покрова и наличия промёрзшего грунта, препятствующего инфильтрации.

По данным Гидрометеослужбы России и материалов Государственного доклада о состоянии окружающей среды Ленинградской области, суммарная испаряемость в регионе составляет в среднем 450–500 мм в год, что в совокупности с уровнем осадков формирует умеренный водный баланс с выраженной сезонной неравномерностью. Наибольшее количество осадков выпадает в виде дождя в тёплый период года, что способствует формированию паводков дождевого типа в летне-осенний

период. Также важной климатической характеристикой является термический режим почвы, который влияет на динамику мерзлотных процессов, особенно в периоды межсезонья. Частые возвраты холодов весной и поздние заморозки влияют на развитие растительности, замедляя начало вегетационного периода [5]. Осенью почвы часто переувлажнены, что приводит к застою влаги и повышенной заболоченности в пониженных участках ландшафта, особенно в поймах и низинах. Климат бассейна реки Луга также определяет структуру растительности и биоразнообразие региона. Умеренно влажный климат благоприятствует развитию хвойно-широколиственных лесов, с преобладанием ели, сосны, берёзы и осины. Влажные низины, избыточно увлажнённые почвы, а также наличие частых туманов создают благоприятные условия для развития болотных экосистем. По данным Института географии РАН, регион относится к зоне умеренной болотизации с преобладанием переходных и верховых болот. Климатические риски для региона связаны, в первую очередь, с высокой повторяемостью экстремальных погодных явлений, таких как сильные ливни, шквалы, а также зимние оттепели, приводящие к образованию наледи и гололёда. Наблюдается тенденция к росту среднегодовых температур, особенно в зимний период, что согласуется с общими трендами изменения климата, отмечаемыми Росгидрометом и другими международными организациями (IPCC, 2021). Это может привести к смещению фаз сезонных процессов, увеличению длительности вегетационного периода, но также к усилению эрозионных процессов и изменению структуры водного баланса.

## 2.4 Гидрологические характеристики

Формирование гидрологического режима реки Луга обусловлено взаимодействием климатических условий, геоморфологических факторов и внутренних гидрологических процессов. Водоток отличается умеренной извилистостью русла, наличием участков поймы различной ширины и плотной сетью притоков, которые обеспечивают поступление дополнительного стока в течение всего года. Сезонные изменения водности обусловлены, прежде всего, весенним половодьем, вызванным интенсивным снеготаянием, а также эпизодическими паводками, возникающими в результате ливневых осадков в тёплый период года.

Гидрографическая система Луги включает в себя 33 притока, из которых 17 впадают с левой стороны, а 16 — с правой. Наиболее значительным из них по водности и протяженности является река Оредеж, впадающая в Лугу у населенного пункта Плоское. Особый гидрологический интерес представляет рукав Россонь, соединяющий Лугу с Нарвой: направление водообмена между реками изменяется в зависимости от уровней воды — при превышении уровня в Нарве происходит переток в Лугу, в обратном случае — сток уходит в Нарву. Это явление отражает сложную динамику межбассейновых связей, обусловленную как естественными, так и антропогенными факторами.

Среди левых притоков можно выделить - левобережные: Кленка, Вревка, Рыбинка, Чернецкий ручей, Островенка, Каменка, Губенка, Обнова, Саба, Лыченко, Долгая, Верца, Славянка, Нотика, Орьевка, Россонь, и правобережные - Мертвица, Черная, Тресна, Лузно, Удрайка, Переволока, Оредеж, Ящера, Кемка, Лемовжа, Пеледа, Вруда, Лубенка, Хревица, Азика, Касколовка. Русло Луги отличается незначительным средним уклоном, составляющим порядка 0,16‰, что является характерной чертой равнинных рек с преимущественно умеренным течением и невысокой скоростью водного потока.

Плотность речной сети в пределах бассейна варьируется от 0,49 до 1,15 км/км<sup>2</sup>, в среднем достигая 0,70 км/км<sup>2</sup>, что свидетельствует о достаточно развитой системе водотоков. Наличие большого количества болот и озёр играет важную роль в перераспределении поверхностного стока, смягчая пики водообеспеченности в периоды половодья и обеспечивая поддержание водности в меженные периоды. Эти природные резервуары способствуют регулированию гидрологического режима, играя роль буфера, сглаживающего как паводочные явления, так и резкие понижения уровня воды.

Средний многолетний расход воды в нижнем течении реки, в районе города Кингисепп, составляет порядка 86,3 м<sup>3</sup>/с. Для Луги характерны высокие уровни весеннего половодья, достигающие превышения среднего уровня на 5–6 метров. В летний период возможны кратковременные, но интенсивные паводки, обусловленные ливневыми осадками, сменяющиеся резким падением уровня воды. Зимняя межень отличается устойчиво низкими значениями, обусловленными как снижением атмосферных осадков, так и частичным промерзанием водосборной территории, что ограничивает поступление стока в основное русло.

## 2.5 Растительность

Почвенно-растительный покров Ленинградской области сформировался после последнего оледенения. В ледниковый период климат региона был холодным, и на его территории преобладала тундровая растительность. Примерно 10–11 тысяч лет назад климат стал более тёплым, что привело к распространению лесов. В естественных условиях на подзолистых почвах доминировали хвойные — еловые и сосновые — леса. Подзолистые почвы характеризуются наличием под тонким органическим горизонтом светлого слоя, обеднённого элементами питания, но насыщенного кремнеземом. Этот слой имеет зольный оттенок, благодаря чему почва получила название «подзолистая». В зависимости от степени вымывания различают сильно подзолистые, среднеподзолистые и слабоподзолистые почвы. На хорошо дренированных суглинистых участках формируются еловые леса на сильно подзолистых почвах. На супесчаных и песчаных грунтах развиваются сосновые леса на слабоподзолистых почвах. В понижениях рельефа встречаются переувлажненные почвы. На участках с ухудшающимся естественным дренажом почвы приобретают характеристики заболоченности, где преобладают еловые и сосновые леса, а также торфянисто-подзолистые и торфяно-глеевые типы почв. На сухих возвышенных участках обычно формируются сосняки с мохово-лишайниковой растительностью, в то время как на более увлажнённых территориях развиваются брусничные и черничные леса. Среднеподзолистые почвы встречаются на суглинках в более высоких и менее увлажнённых районах, часто под сосновыми, реже еловыми лесами. Эти почвы широко распространены на Карельском перешейке, а также в бассейнах рек Паша и Оять. Подзолистые почвы характеризуются низким содержанием перегноя и высоким уровнем кислотности. Для достижения высоких урожаев они требуют известкования, а также применения минеральных и органических

удобрений. Дерново-подзолистые почвы формируются на участках с развитой травянистой растительностью, в редких смешанных лесах или на вырубках. Эти почвы содержат больше перегноя и имеют меньшую кислотность, что делает их более плодородными, по сравнению с подзолистыми. Дерново-подзолистые почвы распространены в западной и южной частях области, а также на крайнем востоке. Особое место занимают почвы Ижорской возвышенности (Ордовикское плато), где в результате воздействия известковых материнских пород образуются плодородные дерново-карбонатные почвы. В прошлом эти земли были заняты широколиственно-еловыми лесами, с преобладанием дуба, вяза, липы и лещины. Высокое содержание извести нейтрализует кислотность почвы и предохраняет верхний слой от вымывания, благодаря чему дерново-карбонатные почвы являются одними из самых плодородных в регионе [2]. В низинах с плохим дренажом, где слабо происходит сток атмосферных вод, формируются болотные почвы. При чрезмерном увлажнении растительные остатки не разлагаются, а накапливаются в виде торфа. Для этих почв характерен сизо-ржавый глеевый горизонт, который неблагоприятно влияет на рост растений. Болотные почвы распространены в области, особенно на востоке Карельского перешейка, побережье Финского залива и в Приладожье. В Приневской низине болотные почвы занимают около 75% земельной площади. Для их эффективного освоения требуется осушение и удобрение. На низких надпойменных и пойменных террасах рек, таких как река Луга, образуются плодородные аллювиальные почвы, которые регулярно заливаются во время половодья, формируя почвы с высокой агрономической ценностью. Для обеспечения хороших урожаев на почвах нашей области необходимо вносить органические и минеральные удобрения, включая азотные, фосфорные и калийные. Закисленные почвы требуют проведения известкования. Также важно очищать поля от валунов.

Освоение территории области связано с изменениями в почвенно-растительном покрове. Значительная часть лесов была вырублена, а на некоторых территориях образованы лесопарки. Наиболее крупными из них являются Невский лесопарк на правом берегу Невы, Центральный курортный в Зеленогорске и Разлив. В настоящее время леса занимают около 54% территории области. Преобладающими являются хвойные, в частности сосновые леса.

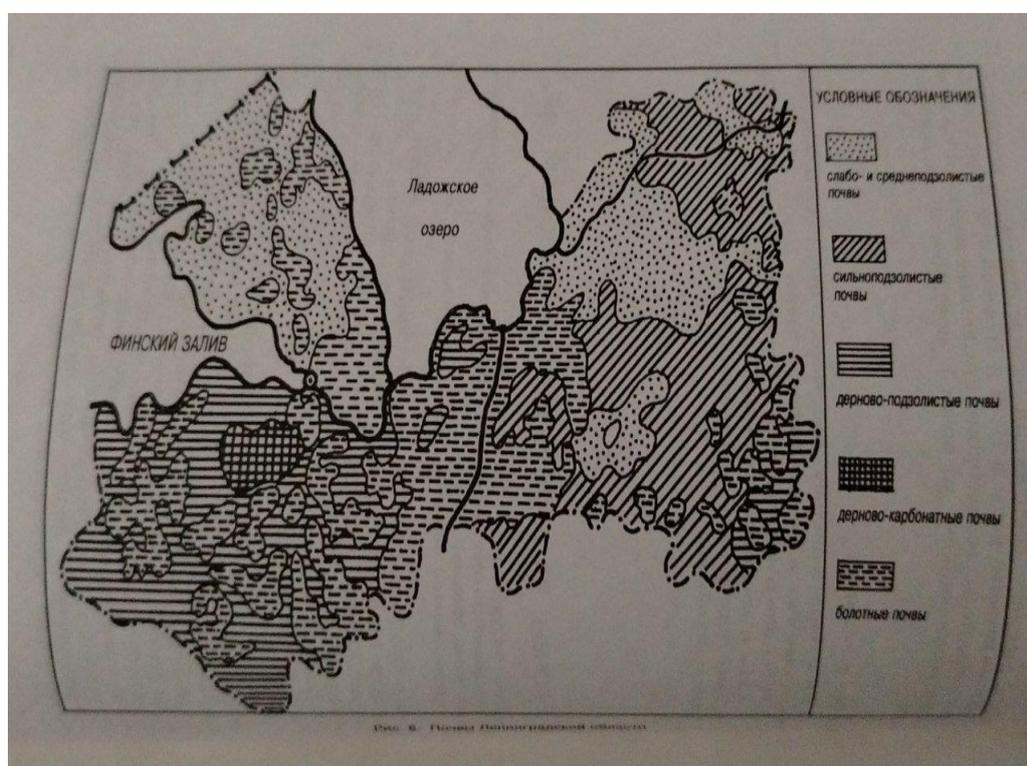


Рис. 2.5.1 Карта-схема почв Ленинградской области

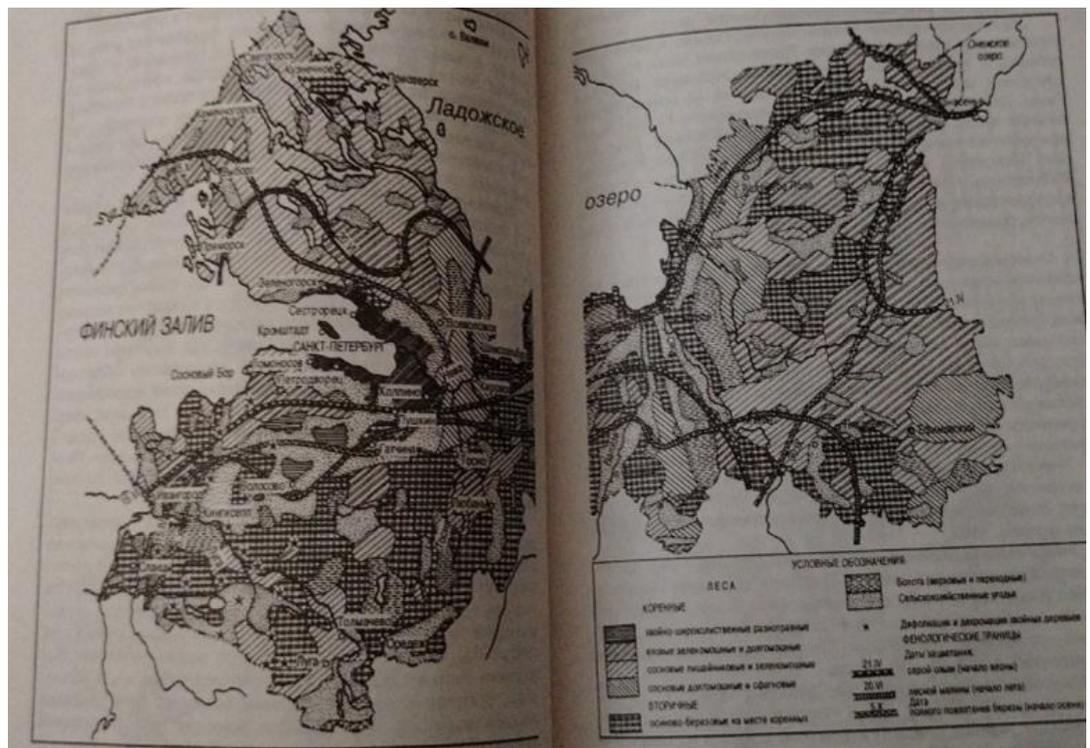


Рис. 2.5.2 Карта растительность Ленинградской области

### 3 Теоретические основы формирования и изменений излучин

#### 3.1 Причины и механизм образования излучин

Феномен меандрирования рек остаётся одной из ключевых тем в геоморфологии и до сих пор вызывает оживлённые научные споры. Вопрос о механизмах, которые приводят к формированию извилистых русел, не имеет однозначного решения, и множество исследователей предлагали различные гипотезы на этот счёт. Уже к середине XX века в научном сообществе существовало свыше 40 различных теорий, объясняющих причины возникновения меандров [Экспериментальная геоморфология, 1969]. С тех пор их число продолжает расти, поскольку новые исследования открывают дополнительные факторы, влияющие на этот процесс. Подробные критические обзоры различных гипотез представлены в трудах отечественных и зарубежных учёных [Маккавеев, 1955; Leopold, Wolman, 1960; Yang, 1971; Hakanson, 1973; Знаменская, 1976; Knighton, 1977; Замышляев, 1978; Callander, 1978; Матвеев, 1985; Сидорчук, Михинов, 1985]. Некоторые гипотезы, предложенные в прошлом, утратили свою актуальность и теперь имеют лишь историческую ценность. Среди таких концепций особенно выделяется теория, связывающая процесс меандрирования с действием силы Кориолиса — инерционной силы, обусловленной вращением Земли вокруг своей оси [Бэр, 1860; Einstein, 1926]. Согласно этому предположению, именно влияние Кориолисовой силы заставляет реки изгибаться в определенном направлении. Однако эта идея была опровергнута как с гидродинамической точки зрения [Werner, 1951; Yang, 1971; Rachocki, 1973], так и на основе географических данных. Если бы данный механизм действительно играл ведущую роль в образовании меандров, то

интенсивность изгибов рек должна была бы возрастать по мере удаления от экватора к полюсам. Однако наблюдения показывают, что значительных различий в извилистости русел рек, протекающих в низких и высоких широтах, не существует. Более того, изогнутые русла встречаются даже вблизи экватора, где ускорение Кориолиса минимально. Дополнительные исследования также не выявили статистически значимых различий между параметрами левосторонних и правосторонних меандров. Это указывает на то, что сила Кориолиса оказывает несущественное влияние на их формирование. Например, в бассейне реки Камы [Бутаков и др., 1997] было установлено, что скорость бокового смещения излучин, которая в среднем составляет от 0,1 до 1 м в год, в 1,5–2 раза выше в отдельных случаях. Однако при этом у одних рек такая тенденция наблюдается у правосторонних изгибов, а у других — у левосторонних, что исключает влияние Кориолиса как единственного объясняющего фактора [7].

На данный момент среди современных исследователей ведутся активные дискуссии о природе меандрирования, и в качестве основных объяснительных моделей выделяют несколько ключевых теоретических подходов. Учитываются такие факторы, как взаимодействие потока воды с руслом, размыв и аккумуляция пород, влияние грунтовых вод, изменения уклона местности и колебания уровня воды. Каждый из этих факторов может вносить свой вклад в процесс формирования извилистых русел, и только комплексный анализ позволяет приблизиться к пониманию сложной динамики меандрирования рек.

### 3.2 Условия формирования излучин

Свободное меандрирование развивается на тех участках речных долин, где отсутствуют существенные ограничения для планового смещения русла. В подобных условиях ширина долины и геоморфологическая конфигурация склонов, как правило, позволяют руслу перемещаться в горизонтальной плоскости, реализуя всю амплитуду своей динамики. В таких ситуациях излучины не сдерживаются боковыми уступами террас и склонов, вследствие чего обретают способность к полному прохождению всех стадий морфогенеза. В условиях свободного меандрирования излучины демонстрируют сложное морфологическое развитие: они постепенно трансформируются от слабовыраженных синусоидальных изгибов или практически прямолинейных участков до ярко выраженных петлеобразных структур. Эти формы, развиваясь, достигают состояния, при котором противоположные берега петли сближаются настолько, что происходит прорыв перешейка — один из ключевых этапов цикла меандрирования. После такого прорыва бывшая излучина теряет связь с основным руслом, трансформируется в изолированный водоём — старицу, и постепенно деградирует, переходя в фазу заболачивания или полного зарастания. На месте прорыва формируется спрямлённый участок, обладающий повышенной энергетикой и, как следствие, склонный к началу нового цикла меандрирования. Таким образом, развивается периодический морфогенетический процесс, в рамках которого каждый участок русла проходит через стадии зарождения изгиба, его усиления, прорыва и образования нового спрямлённого фрагмента. Направление следующего цикла может совпадать с вектором предшествующего развития, однако нередко наблюдаются случаи, когда излучины нового поколения формируются в противоположную сторону — это связано с характером

сопряжения смежных изгибов и локальной асимметрией гидравлического потока [9].

Процесс формирования излучин сопровождается различными формами плановой деформации русла. Эти деформации развиваются неравномерно, в результате чего даже соседние излучины могут находиться на разных стадиях развития. На начальном этапе преобладают процессы сползания, когда русло смещается в сторону вогнутого берега. При достижении значительных углов поворота — порядка 120–150°, характер смещения меняется: начинается разворот излучины вокруг условной опорной точки, расположенной вблизи геометрического перегиба русла. Эта точка сохраняет относительную устойчивость в пространстве, формируя своего рода узел вращения, в пределах которого происходит конфигурационная перестройка меандра. При дальнейшем развитии излучины её форма теряет симметрию и постепенно приобретает асимметричный вид. Морфометрический анализ показывает, что с увеличением степени асимметрии возрастает и сложность внутренней структуры излучины: возрастает количество плесов, наблюдаются признаки их раздвоения, появляются дополнительные элементы руслового микро рельефа. В отдельных случаях между перегибами одной излучины формируется до шести-восьми плесов, что свидетельствует о высокой зрелости и гидродинамической активности рассматриваемого фрагмента русла. Однако далеко не каждая излучина достигает овальной или эллипсоидной формы. В силу неравномерности пространственного и временного развития смежных изгибов возможно так называемое «наплывание» одной излучины на другую. При этом нижележащая излучина принимает удлинённые, вытянутые очертания, близкие к пальцеобразным, а конфигурация верхней становится причиной частичной дестабилизации течения в зоне их сопряжения. Свободное меандрирование не ограничивается формированием только классических извилин. В некоторых случаях, например, при последовательных прорывах

перешейков между двумя крупными излучинами, может возникнуть объединённая структура, визуально напоминающая П-образный изгиб. Такая конфигурация, как правило, нестабильна. Русло, пройдя стадию спрямления, возобновляет процесс бокового перемещения, формируя новые изгибы, нередко возвращающиеся к изначальному плановому рисунку до момента объединения. Кроме того, геоморфологические особенности поймы, такие как наличие останцов или выступов коренных пород, могут заметно влиять на плановую морфологию русла. Надвигаясь на препятствие, русло деформируется — излучины сжимаются, образуя конфигурации, напоминающие сжатую пружину. Это также может приводить к возникновению локальных зон аккумуляции и эрозии. Важнейшую роль в развитии и эволюции излучин играет соотношение между направлением пояса меандрирования и русловым потоком во время половодья. Прорыв отдельных петель может приводить к изменению положения пояса меандрирования в пределах долины. Это явление существенно влияет на структуру долины в целом: центральные участки, где влияние боковых склонов минимально, демонстрируют наиболее устойчивые формы меандрирования. Наоборот, на участках, где пояс меандрирования прижат к склонам, излучины могут развиваться асимметрично, быть разобцены длинными прямолинейными фрагментами и даже врезаться в склон, формируя в плане последовательность полукруглых углублений. Причины смещения оси меандрирования могут быть разнообразны. Среди них выделяются такие факторы, как проявление кориолисового эффекта, тектонические движения в пределах долины (в том числе локальные поднятия и опускания её дна), а также естественные прорывы петель, вызывающие локальные морфодинамические перестройки.

### 3.3 Влияние внешних факторов на развитие излучин

Развитие излучин в руслах рек отражает высокую степень чувствительности гидроморфологической системы к комплексу внешних воздействий. Русловая сеть не является структурой с жёсткими границами: она подвержена изменениям, обусловленным как внутренней динамикой потока, так и совокупностью экзогенных факторов, взаимодействующих на разных пространственно-временных масштабах. Особенность функционирования излучин заключается в их способности быстро адаптироваться к изменяющимся условиям, одновременно выполняя роль механизма перераспределения энергии и наносов в пределах речной системы. Меандрирование реки следует рассматривать не как частное проявление эрозионных процессов, а как элемент пространственной самоорганизации потока. Однако характер и интенсивность этой самоорганизации детерминируются внешними условиями — геоморфологическими, климатическими, геологическими, гидрогеологическими и антропогенными. В этом контексте становится актуальным рассмотрение внешних факторов не как фона, а как определяющих агентов морфогенеза русловых форм. Климат выступает ключевым регулятором водно-седиментационного режима реки. Динамика осадков, температурных режимов, испарения и снежного покрова определяет гидрограф потока и его сезонную изменчивость. Повышение интенсивности ливневых осадков в сочетании с деградацией снежного покрова изменяет распределение стока во времени, приводя к смещению фаз высоких вод и, как следствие, к перераспределению пиковой нагрузки на русловую структуру. Участвовавшие экстремальные паводки, зафиксированные в последние десятилетия на ряде равнинных и предгорных рек, обостряют механизмы боковой эрозии, особенно в зонах перегиба меандров. В условиях резкого повышения уровня воды и скорости течения усиливаются напряжения у внешних берегов, что

приводит к активации обрушений, отступанию урезом и, в перспективе, к смещению всей петли излучины. В то же время периоды устойчивого маловодья могут приводить к формированию вторичных русел, рецессии активного потока и консервации отдельных меандрированных участков. Формы и темпы русловой деформации напрямую зависят от состава и структуры залегающих отложений. В условиях рыхлых аллювиальных пород, насыщенных влагой, русло проявляет повышенную подвижность — скорость миграции излучин может достигать нескольких метров в год, особенно на участках с выраженной глубинной эрозией. Напротив, присутствие коренных пород вблизи поверхности или наличие плотных глин и супесей с высокой связностью ограничивает развитие боковых деформаций, способствуя закреплению положения русла и уменьшению амплитуды колебаний кривизны. Литологическая неоднородность порой становится триггером асимметричной трансформации русла: когда один берег сложен слабоцементированными отложениями, а противоположный — устойчивыми грунтами, формируется ярко выраженное неравномерное развитие меандровой петли. Также литология определяет склонность берегов к специфическим видам разрушения — от мелких оползней до масштабных обрушений с образованием обрывов и отмелей. Биотическое наполнение береговой зоны является фактором, способным как замедлить, так и ускорить развитие излучин. Структура корневых систем древесной и кустарниковой растительности, особенно в поймах и на надпойменных террасах, оказывает стабилизирующее воздействие на прибрежные откосы, снижая их подверженность к эрозии. Вместе с тем избыточное зарастание русловой зоны может вызывать гидравлические эффекты, изменяющие профиль потока: распределение скоростей становится неравномерным, возникают зоны вторичных завихрений, что провоцирует перераспределение седиментационного потока и изменение направления основной струи. Почвенно-грунтовые характеристики, включая гранулометрический состав, влагоудерживающую способность и глубину

залегания подвижных слоёв, определяют механическую прочность берегов. В зонах с переувлажнёнными почвами или с высоким уровнем капиллярного поднятия грунтовых вод формируются условия для развития подпочвенной эрозии, скрытого подмыва и последующего обрушения берегов, в том числе с образованием оврагов, впадающих в основное русло. Инженерное вмешательство в природную морфологию русел приобретает всё больший масштаб, особенно в районах активного землепользования. Русла рек часто подвергаются спрямлению, укреплению берегов, регулированию стока посредством плотин и шлюзов. Все эти мероприятия в краткосрочной перспективе могут стабилизировать положение русла, однако в долгосрочной перспективе ведут к дисбалансу наносов, снижению самоочищающей способности реки, сужению зоны меандрирования. Часто зафиксированы случаи, когда изъятие песчано-гравийного материала из русла вызывало локальное понижение дна и запуск процессов инверсии русловой деформации: участок, ранее подверженный аккумуляции, переходит в фазу активной эрозии. Также распространённым эффектом инженерных вмешательств является «переламывание» траектории струи, когда под воздействием гидротехнических сооружений формируются неестественные очаги концентрации потока, провоцирующие разрушения в непредусмотренных зонах.

Гидрогеологический режим оказывает комплексное влияние на развитие излучин, особенно в нижнем и среднем течении рек. Уровень залегания водоносных горизонтов и их связь с открытым руслом определяют степень подпитки потока, особенно в меженный период. Присутствие подпочвенного питания способствует сохранению минимального расхода воды, что поддерживает активность русловых процессов даже в засушливые сезоны. [1].

Классификация ГГИ охватывает все перечисленные выше параметры и находит применение в ряде нормативных актов. Изначально её основы

были заложены И. В. Поповым, а впоследствии усовершенствованы и расширены Н. Е. Кондратьевым. Представленная на рисунке 3.3.1 система классификации русловых процессов по ГГИ

- ленточный
- грядовый;
- побочный;
- ограниченное меандрирование;
- свободное меандрирование;
- незавершённое меандрирование;
- пойменная многорукавность;
- русловая многорукавность.

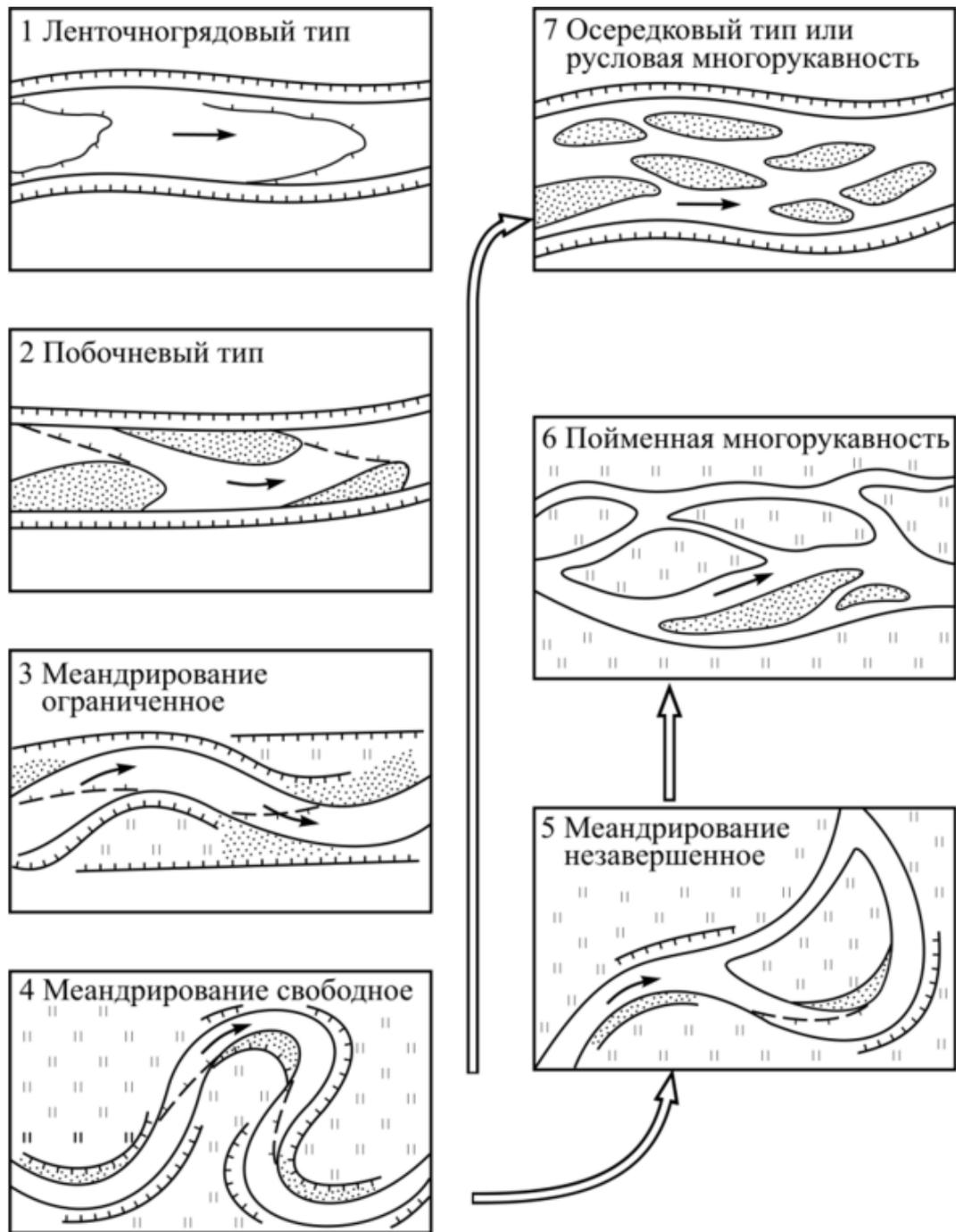


Рисунок 3.3.1 Система классификации русловых процессов по ГГИ

Данная последовательность классов отображает количественное изменение возможностей потока к транспорту наносов. Среди альтернативных российских классификаций следует отметить морфодинамическую типизацию, ГГИ, созданную Р. С. Чаловым (классификация МГУ) (рисунок 3.3.1 и 3.3.2). Базовым является разделение всех водотоков на равнинные, полугорные и горные.

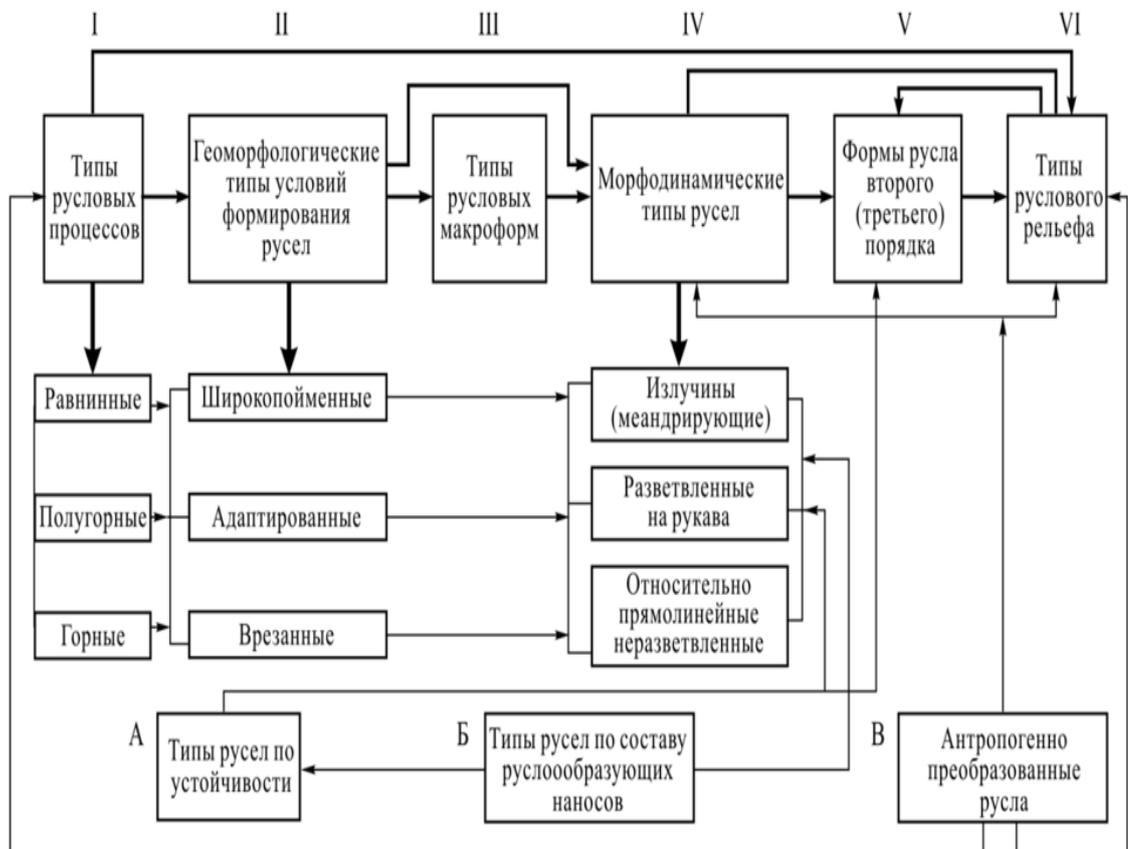


Рисунок 3.3.2 – Структура морфодинамической классификации русел Р.

С.Чалова [10]

Для оценки размеров и формы излучин используются следующие характеристики («измерители» по терминологии ГГИ) (рисунок 3.3.3): Шаг излучины  $L$  – это расстояние между вершинами соседних излучин;

Стрела прогиба  $h$  – перпендикуляр, проведенный от оси пояса меандрирования по направлению к вершине излучины. Две смежных стрелы прогиба в сумме равны ширине пояса меандрирования ( $B_m=2h$ );

Длина излучины по руслу  $l$  – это сумма длин левого и правого крыла одной излучины;

Радиус кривизны  $r$  – это радиус, который описывает кривую геометрической оси русла на превалирующей части излучины (допустим, если излучина имеет сегментную или петлеобразную форму) либо в ее привершинном сегменте (в случае, если форма излучины – синусоидальная);

Ширина русла при вершине излучины – может измеряться и в межень период, и в период подъема воды. При наличии побочня у выпуклого берега ширина может значительно различаться в периоды разных фаз водности, поэтому ее стоит измерять в таких случаях также в местах крыльев, в привершинном створе, в средней части и в створах на границах прямолинейных вставок;

Безразмерные показатели:

Степень развитости  $l/L$ ;

Показатель формы  $r/h$

На рисунке 3.3.3 указаны морфологические элементы излучин, где *а* - при плавном переходе; *б* - при наличии прямолинейных вставок

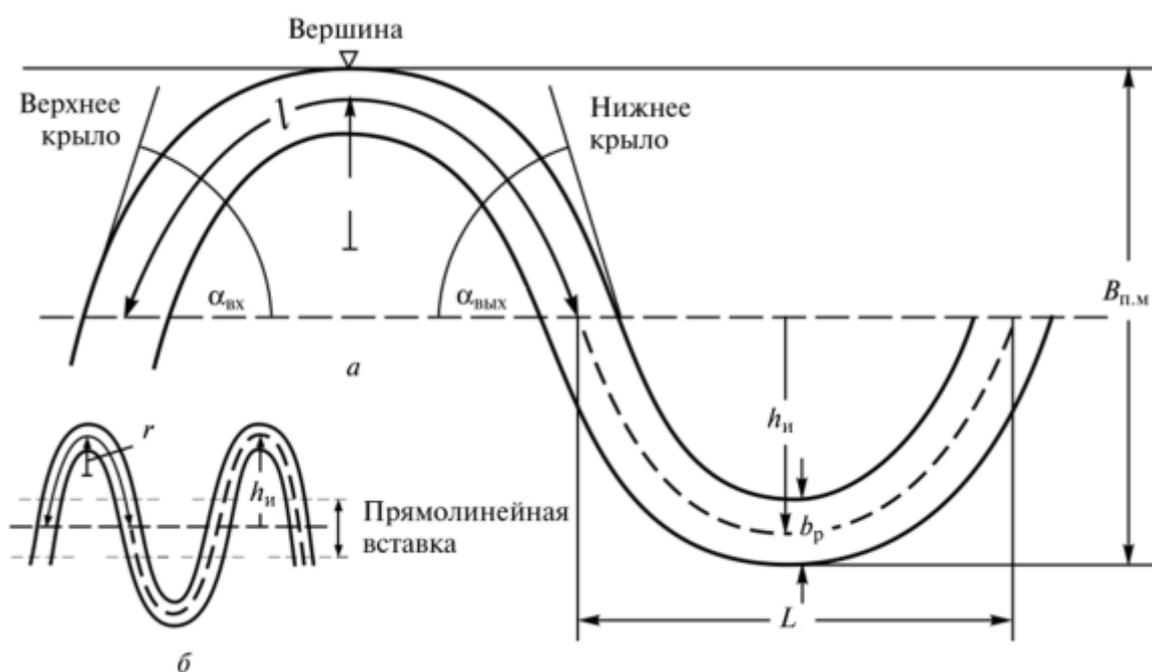


Рисунок 3.3.3 Морфологические элементы излучин

Были построены следующие графики рис. (3.3.4-3.3.6) – зависимость длины излучины ( $\lambda$ ) от полноты излучины, распределения развитости и асимметрии излучины по длине участка, частоты развитости и распределения развитости излучин по длине участка

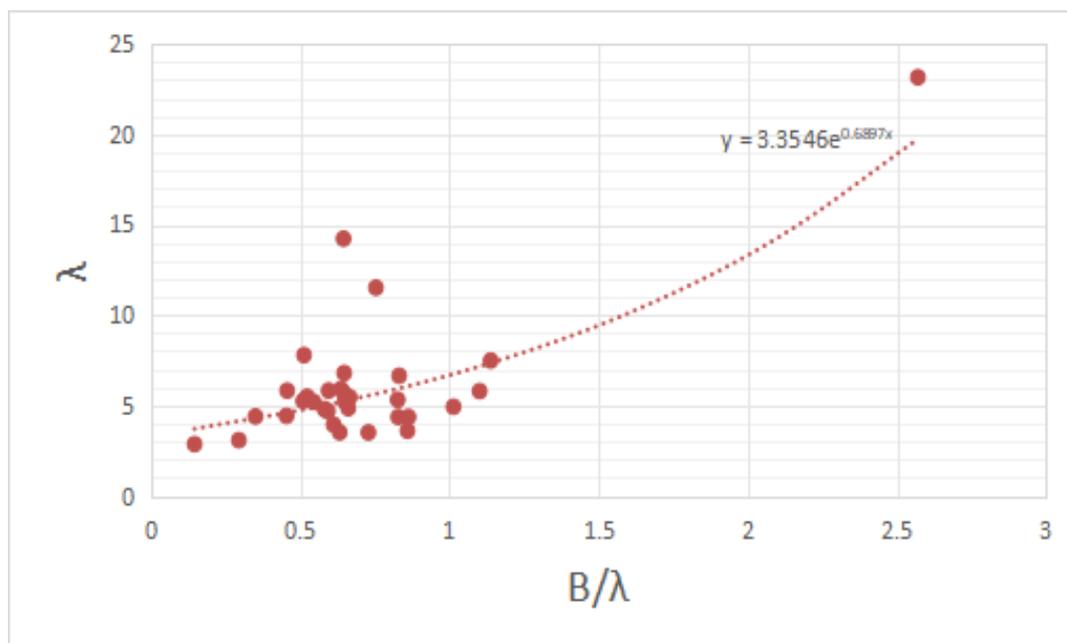


Рисунок 3.3.4 График зависимость длины излучины ( $\lambda$ ) от полноты излучины



Рисунок 3.3.5 Распределения развитости и асимметрии излучины по длине участка



Рисунок 3.3.6 Графики частоты развитости и распределения развитости излучин по длине участка

#### **4 Методы исследования изменений излучин реки**

Исследование процессов изменения излучин в речных руслах представляет собой одну из ключевых задач в области инженерной гидрологии и русловой морфодинамики. Эволюция излучин является результатом длительного взаимодействия русловых течений, наносных процессов и геологических условий, однако важнейшим аспектом в научной практике остаётся разработка и применение достоверных методов анализа, позволяющих не только зафиксировать изменения, но и понять механизмы, стоящие за трансформацией русловой формы. Для этого используется совокупность наблюдательных, инструментальных, дистанционных, моделирующих и лабораторно-полевых методов, каждый из которых раскрывает отдельные аспекты русловой динамики. Классическим и по-прежнему актуальным направлением является картографический анализ, основанный на сопоставлении материалов топографической съёмки разных временных периодов. Сравнивая архивные и современные карты, исследователь получает возможность количественно определить смещение береговой линии, изменение положения оси русла, ширины и радиуса кривизны излучин. Точность таких измерений зависит от качества исходных данных, но даже при наличии неточностей в координатной сетке возможно выявление тенденций, особенно если рассматривать участки с интенсивным меандрованием. В последние десятилетия этот подход получил серьёзную поддержку за счёт развития цифровых геодезических методов, включая применение GNSS-систем и беспилотных летательных аппаратов, позволяющих создавать ортофотопланы и цифровые модели рельефа с высокой пространственной точностью. Это существенно улучшает пространственную детализацию руслового анализа, позволяя фиксировать даже незначительные изменения в плановой конфигурации потока.

Наиболее динамично развивающимся направлением является использование данных дистанционного зондирования Земли, в первую очередь спутниковых снимков. Многолетние серии изображений, полученных с помощью платформ Landsat, Sentinel, WorldView и других спутников, дают возможность отслеживать миграцию русла в интервале от нескольких лет до нескольких десятилетий. Современное программное обеспечение в области геоинформационного анализа позволяет автоматизировать обработку изображений, выделять активное русло, анализировать форму и развитие меандров, строить цифровые карты изменений. Особенно ценной становится возможность наложения временных рядов изображений, что даёт наглядное представление об интенсивности русловой динамики. Анализ индексов растительности, влажности и водности в прибрежной зоне позволяет косвенно судить о гидрологическом режиме, воздействии на прибрежные экосистемы и степени стабилизации берегов растительным покровом.

Наряду с дистанционными методами, ключевую роль продолжают играть непосредственные гидрологические и гидрометрические наблюдения. Измерения уровней воды, расходов, скоростей течения и характеристик наносов проводятся на стационарных постах, вахтовыми методами или с использованием современных акустических приборов, таких как ADCP. Эти данные необходимы для оценки энергетики потока, распределения скоростей вдоль излучин, определения зон максимального гидравлического воздействия, а также для последующего использования в моделях. Без эмпирического подтверждения расчётные или спутниковые методы не могут рассматриваться как полностью достоверные, поскольку именно натурные замеры позволяют соотнести теоретические представления с реальными условиями конкретного участка русла. Не менее важным направлением в исследовании излучин остаётся математическое моделирование. Применение численных гидродинамических моделей даёт возможность реконструировать как

текущее состояние русла, так и спрогнозировать его эволюцию. Программы, такие как MIKE 11/21, HEC-RAS, Delft3D и аналогичные, позволяют моделировать течение воды, перераспределение наносов, напряжения сдвига на берегах и миграцию русловой оси в зависимости от водного режима и морфологических условий. Такие модели требуют тщательной калибровки на основе полевых данных, однако при правильной настройке позволяют получать прогнозы с высокой степенью детализации, в том числе моделировать влияние инженерных вмешательств, паводков, изменения растительности и других факторов на развитие излучин. Особую ценность представляют натурные и лабораторные физические эксперименты. Несмотря на повсеместное распространение численного моделирования, физические модели — масштабные имитационные стенды, создаваемые в гидротехнических лабораториях — сохраняют своё значение. Они позволяют наблюдать реальные процессы формирования русла при контролируемых условиях, варьируя уклон, расход воды, тип наносов и конфигурацию берегов. В лабораторных условиях можно чётко отследить влияние изменения угла атаки потока, конфигурации изгиба, скорости течения на формирование и разрушение берегов. Эти эксперименты особенно важны при изучении механизмов образования вторичных излучин, изолированных протоков и зон аккумуляции, а также при проверке устойчивости берегозащитных конструкций. Дополнительным источником информации служат полевые трассировочные эксперименты. В русле могут закладываться меченые частицы (например, с использованием RFID-меток или флуоресцентных добавок), которые отслеживаются по мере их перемещения. Это позволяет определить реальное направление движения наносов, оценить вклад взвешенного и донного транспорта в формирование излучин, а также рассчитать скорости миграции материалов по горизонтали и вертикали. Сопоставление данных по трассировке с результатами спутникового

анализа и гидравлических расчётов создаёт уникальную возможность тройной верификации русловой динамики.

## 5 Дистанционные методы и ГИС-анализ

Современное развитие дистанционных методов и геоинформационных систем (ГИС) открыло принципиально новые возможности для анализа речных излучин, предоставляя инструментарий для всестороннего изучения пространственно-временной динамики русловых процессов. В отличие от традиционных полевых наблюдений, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) позволяет исследовать большие площади за продолжительные промежутки времени с высокой частотой и в единой координатной системе. Это особенно актуально для излучин, подверженных долгосрочной миграции, циклам активизации и затухания русловых деформаций, а также внешнему антропогенному и климатическому воздействию. Основу дистанционного подхода составляет анализ космических снимков различного спектрального разрешения. Архивные изображения, начиная с миссий Landsat 1 и вплоть до современных систем Sentinel-2, WorldView и PlanetScope, дают возможность построить ретроспективные ряды миграции русла, начиная с 1970-х годов. Сопоставление многовременных изображений, особенно при их унификации по сезону и уровню освещённости, позволяет выявить смещение береговых линий, изменение радиусов кривизны, ширины русла, развитие пойменных водотоков и формирование новых меандровых петель.

Применение спектральных индексов в анализе речных участков усиливает информативность дистанционных данных. Индексы, такие как NDWI (нормализованный водный индекс), MNDWI (модифицированный водный индекс) и EVI (индекс растительности), позволяют с высокой точностью выделить активное русло, определить степень увлажнённости прибрежной зоны и динамику пойменной растительности. Эти данные особенно ценны при изучении пойменных процессов, которые тесно связаны с развитием излучин, включая расширение или сокращение поймы, формирование временных русел и обводнённых протоков. ГИС-анализ

выступает интеграционной платформой, в рамках которой возможно объединение различных пространственных данных, в том числе цифровых моделей рельефа, космических снимков, топографических планов, границ водосборов и инженерных объектов. На основе ГИС-моделей формируются векторные представления речных осей, береговых линий, центроидов излучин и аксиальных линий деформации. Это позволяет не только визуализировать изменение формы излучин, но и производить количественный анализ. Расчёты кривизны русла, длины меандровых дуг, соотношения длины русла к длине долины (индекс извилистости), а также радиусов закругления излучин становятся возможными в автоматизированном режиме. Важно отметить, что пространственная привязка и сопоставимость данных в ГИС требуют строгой геометрической корректности. При использовании мультиисточниковой информации осуществляется трансформация координат, геопривязка сканов карт, верификация точек с известной геолокацией. Эта процедура обеспечивает сопоставимость многовременных данных, в том числе при анализе русловой динамики на масштабах нескольких десятилетий. Особую ценность представляет объединение дистанционных методов с цифровыми моделями высот (DEM), полученными как из спутниковых данных (например, SRTM, ALOS PALSAR), так и с помощью фотограмметрии и LiDAR-съёмок. DEM позволяет восстановить микрорельеф русла, определить пойменные террасы, русловые борта, а также выполнить гидрологическую предобработку: выделить водосборные поверхности, определить направления стока, локализовать водоразделы. В совокупности с дистанционными наблюдениями это даёт возможность построения полной трёхмерной картины русловой морфологии и её изменений. Среди наиболее прогрессивных подходов — использование временных рядов спутниковых изображений для автоматического трекинга русловых осей. Такие алгоритмы позволяют без участия оператора отслеживать смещение центра русла и оценивать темпы миграции излучин.

В ряде случаев применяются методы машинного обучения для классификации береговых линий, сегментации русловой зоны, идентификации процессов подмыва или заиления. Хотя подобные алгоритмы требуют предварительной обучающей выборки и настройки, их внедрение значительно ускоряет обработку больших массивов данных. Дистанционные методы и ГИС-анализ находят широкое применение не только в исследовательских, но и в прикладных задачах: при проектировании гидротехнических сооружений, оценке русловой устойчивости, анализе риска паводков, обосновании берегозащитных мероприятий. В контексте изменения климата и нарастающего антропогенного воздействия возможность оперативного мониторинга состояния русел, включая поведение излучин, становится неотъемлемой частью устойчивого водохозяйственного управления.

## 6 Гидроморфологические и геофизические исследования

Комплексное изучение морфодинамики излучин невозможно без применения гидроморфологических и геофизических методов, которые позволяют не только фиксировать текущее состояние русловой формы, но и оценивать процессы, происходящие в толще русловых отложений, на дне и в прилегающих к руслу породах. Такие методы дают представление о механизмах перераспределения наносов, устойчивости руслового профиля, мощности рыхлых слоёв и характере взаимодействия водотока с подрусовыми структурами. Гидроморфологическое обследование начинается с детального описания геометрии русла. Измерения поперечных и продольных профилей проводятся как при помощи тахеометрической съёмки, так и с использованием эхолотационного оборудования, включая многолучевые эхолоты. Это позволяет с высокой точностью восстановить форму дна, выявить участки углубления и аккумуляции, определить характер распределения скорости течения в излучине. В вогнутой части меандра, как правило, фиксируется углублённое русло с локальными проявлениями донной эрозии, в то время как на выпуклой стороне наблюдается аккумуляция наносов и формирование пологих баров. При анализе русловых деформаций особое внимание уделяется распределению скорости течения. Гидрометрические измерения проводятся в нескольких горизонтах по вертикали, что позволяет установить вертикальную и поперечную структуру течения. Наличие вторичных течений, сдвигового движения воды и вихрей существенно влияет на характер перераспределения наносов, особенно в пределах крутых излучин с выраженным асимметричным профилем. Полученные данные обобщаются в виде распределения гидравлических характеристик: скорости потока, гидравлического уклона, сопротивления дна, коэффициентов шероховатости. Кроме стандартных методов гидрометрии, применяются и акустические доплеровские профилометры

(ADCP), позволяющие регистрировать не только скорость течения, но и структуру потока в 3D-пространстве, включая временные колебания. Это особенно важно при изучении процессов резкой перестройки русла, возникающих во время паводков или при прорыве временных плотин из отложений. Устройства устанавливаются либо стационарно, либо используются на подвижной платформе (например, при буксировке лодкой по заданному профилю).

Геофизические методы дополняют гидроморфологическое обследование за счёт возможности исследования внутренних свойств русловых и прибрежных отложений. Один из ключевых методов — сейсморазведка с применением поверхностных волн (MASW), позволяющая оценить плотность и структуру рыхлых отложений, определить глубину вреза русла, выявить границы между аллювием и коренными породами. Этот метод особенно эффективен на участках, где визуальный анализ ограничен либо по природным, либо по инженерным причинам. Электроразведочные методы, в частности вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) и метод электротомографии, используются для определения уровня залегания грунтовых вод, наличия водоупорных слоёв и характера насыщения русловых отложений влагой. При помощи этих данных можно построить вертикальные разрезы русловой области, отображающие геоэлектрическую структуру, что позволяет делать выводы о мощности наносов, наличии линз гравелисто-песчаных отложений или заиленных прослоек.

На участках с активной миграцией русла применяются также методы георадиолокации (GPR), особенно в обмелевших и временно осушенных зонах русла. Радиолокационные сигналы, проходя через разнокомпонентные отложения, фиксируют границы слоёв, скрытые под поверхностью. Это даёт возможность восстановить стратиграфию русловой толщины, выявить старые русловые рукава, миграционные границы и стадии развития меандров. Иногда, в дополнение к

геофизическим исследованиям, применяются буровые работы и отбор шнековых колонок. По полученным кернам проводится гранулометрический анализ, определяются текстурные особенности отложений, содержание органики, степень окатанности зёрен, что необходимо для реконструкции условий седиментации. Совмещение этих данных с результатами геофизических методов повышает достоверность полученных моделей русловой структуры.

## 7 Математическое и экспериментальное моделирование

Математическое и экспериментальное моделирование играет ключевую роль в изучении русловых процессов, позволяя анализировать развитие излучин в контролируемых условиях и прогнозировать их эволюцию при изменении гидрологических и геоморфологических факторов. Подобные методы позволяют воспроизводить русловую динамику в масштабе времени и пространства, недоступном для прямого наблюдения в природе. Математическое моделирование, как правило, основывается на численном решении уравнений, описывающих движение жидкости, транспорт наносов и изменение русловой формы. В наиболее полном виде применяются уравнения Навье–Стокса, однако для русловых расчётов чаще используются упрощённые формы — уравнения мелкой воды Сен–Венана в сочетании с уравнением непрерывности и эмпирическими зависимостями, описывающими транспорт твердого стока. Это позволяет моделировать движение потока по сложной плановой конфигурации русла, учитывать боковую эрозию, развитие излучин, образование и снос отмелей, а также влияние берегового укрепления и других инженерных сооружений. Модели подразделяются на одномерные, двумерные и трёхмерные. Одномерные (1D) модели ориентированы на линейное распределение параметров потока и используются для крупных участков с преобладающим продольным направлением течения. Однако для анализа излучин, особенно активных меандров с выраженной асимметрией потока, более применимы двумерные (2D) и трёхмерные (3D) модели, способные воспроизводить поперечные компоненты движения воды и взаимодействие течения с берегами. 2D модели наиболее распространены при оценке миграции русла, поскольку они дают представление о распределении скоростей, напряжениях сдвига и зонах депонирования наносов. Особый интерес представляют модели, учитывающие боковую эрозию как результат действия

гидродинамического напора на вогнутый берег. Для её описания применяются функции, связывающие скорость подмыва с напряжением сдвига, временем воздействия потока и литологическими характеристиками берегов. Такие модели позволяют предсказать траекторию движения излучины, формирование новых меандров и разрушение участков, примыкающих к руслу. Примеры программных комплексов, реализующих данные подходы — HEC-RAS, MIKE 21, Delft3D, TELEMAC и другие. Их возможности включают моделирование не только гидравлики, но и транспорта наносов, а также взаимодействия с растительностью, ледовыми процессами и антропогенными объектами. В условиях русловой нестабильности моделирование выполняется в режиме изменения топографии — с шагом во времени, позволяющим отслеживать послойное перераспределение наносов и изменение очертаний излучины. Наряду с численным моделированием активно используются физические (лабораторные) модели, на которых в масштабном виде воспроизводятся процессы течения воды и русловой деформации. Такие установки представляют собой русловые каналы с регулируемым уклоном, подачей воды и наносов, часто изготовленные из прозрачных материалов для визуального контроля. Масштабирование выполняется на основе критериев подобия — в частности, числа Фруда для соблюдения гидродинамического подобия, и соотношений по Шелду для соответствия началу движения частиц. Эти модели позволяют экспериментально проверять устойчивость различных форм русел, характер распределения течений в излучинах, влияние конструкций на перераспределение наносов, а также воспроизводить сценарии русловой перестройки при изменении расхода воды или конфигурации берегов. Физические модели незаменимы в тех случаях, когда требуется отладка проектных решений до их внедрения в натуре. Они позволяют наблюдать взаимодействие потока с береговым укреплением, отложениями и инженерными сооружениями, проводить имитации паводков, заторов и иных экстремальных ситуаций,

оценивать последующее развитие излучины. Одним из важных аспектов является возможность корреляции данных физического эксперимента с результатами численного моделирования, что повышает точность прогноза и достоверность выводов. Совмещение численного и экспериментального подходов позволяет воспроизводить полную картину русловой динамики. В этом случае данные, полученные в лабораторных условиях, используются для калибровки параметров численных моделей — например, коэффициентов шероховатости, устойчивости берегов, параметров седиментации и эрозии. Обратное моделирование также применяется — при помощи численных расчётов определяется зона наибольших изменений, а затем она воспроизводится на физической модели для уточнения механизма деформации. Сложность математических моделей требует надёжной верификации. Для этого используются натурные данные — цифровые модели рельефа русла, измерения глубин, скоростей течения, положения береговых линий в разные годы. Совмещение этих данных с результатами моделирования позволяет уточнять режимы развития излучин, проводить сценарные расчёты при различных гидрологических условиях, в том числе — при резких изменениях водности или вмешательстве в русловую систему.

## 8 Динамика русловых процессов на основе исторических данных

Река Луга, протекающая преимущественно в пределах Ленинградской области, является характерным примером равнинной водной артерии с ярко выраженными процессами русловой динамики. На основе анализа широкого спектра исторических картографических материалов, включая карты Генерального межевания XVIII века, планы межевых съемок XIX века, а также топографические карты советского периода и современные спутниковые снимки, прослеживаются значительные изменения в морфологии и конфигурации русла реки. В дореволюционный период Луга отличалась сложной, разветвленной системой русел с множеством меандров, стариц, пойменных озер и затонов. Протяженность реки вследствие многочисленных изгибов и петель была существенно больше современной, а ширина поймы в отдельных местах достигала нескольких километров. Особенно активные русловые изменения наблюдались в среднем течении Луги, в пределах широкой поймы между населенными пунктами Осьмино и Толмачево, где на протяжении столетий происходило интенсивное формирование новых меандровых петель и отороченных стариц, сопровождающееся переработкой берегов и локальными изменениями положения основного русла. Формирование русловой сети Луги определялось комплексным воздействием природных факторов. Существенную роль играл гидрологический режим реки, характеризующийся высокими весенними половодьями, способствовавшими активной переработке берегов и развитию меандровых деформаций русла. Геолого-геоморфологические условия, представленные рыхлыми песчаными и супесчаными породами, обеспечивали высокую подвижность береговых откосов и способствовали развитию процессов боковой эрозии. Немаловажное значение имела

пойменная растительность, которая оказывала стабилизирующее воздействие на русло, сдерживая развитие эрозионных процессов в местах с плотными зарослями травянистой и древесно-кустарниковой растительности. В XX веке усиливается антропогенное воздействие на русловые процессы реки. Строительство инженерных сооружений — мостов, дорог, спрямление отдельных участков русла, а также мелиоративные работы в пойме привели к частичной стабилизации русла, снижению его естественной подвижности и уменьшению масштабов русловой миграции. Количественный анализ изменений, основанный на сопоставлении архивных картографических источников и современных геоинформационных данных, показывает, что средняя скорость бокового смещения русла на незакрепленных участках составляла 0,5–1,0 метра в год, а в отдельных случаях достигала 1,5–2 метров в год при неблагоприятных гидрологических условиях.

Но такие изменения в русле реки не могут быть выявлены при помощи современных, доступных, ГИС технологий. А цифровые модели местности, аэрофотосъемки доступные в архиве имеют завышенную для их покупки цену.

На рисунках 8.1-8.4 представлены снимки участка реки Луга, который расположен выше по течению города Кингисеппа в разные года. Снимок (рис. 8.5) сделанный в 1985 году и снимок 2025 года (рис. 8.2) почти не видно изменений в русловом процессе или они настолько малые, что за 40 лет не было ни каких изменений. То есть возможно происходил размыв который не возможно увидеть через спутниковые снимки так как они в основном имеют расширение 30 на 30 метров.



Рисунок 8.1 Космический снимок 2025 год река Луга



Рисунок 8.2 Снимок 2019 года



Рисунок 8.3 Снимок 2010 года

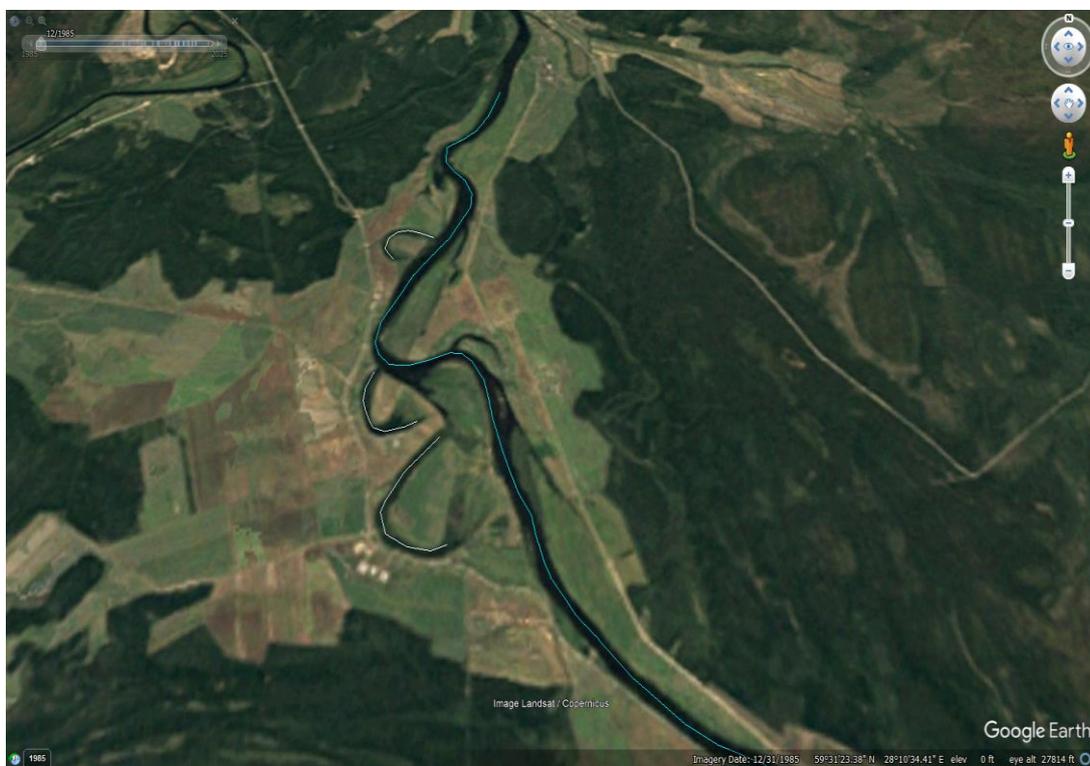


Рисунок 8.4 Снимок 1985 года



Рисунок 8.5 Снимок 2019 года

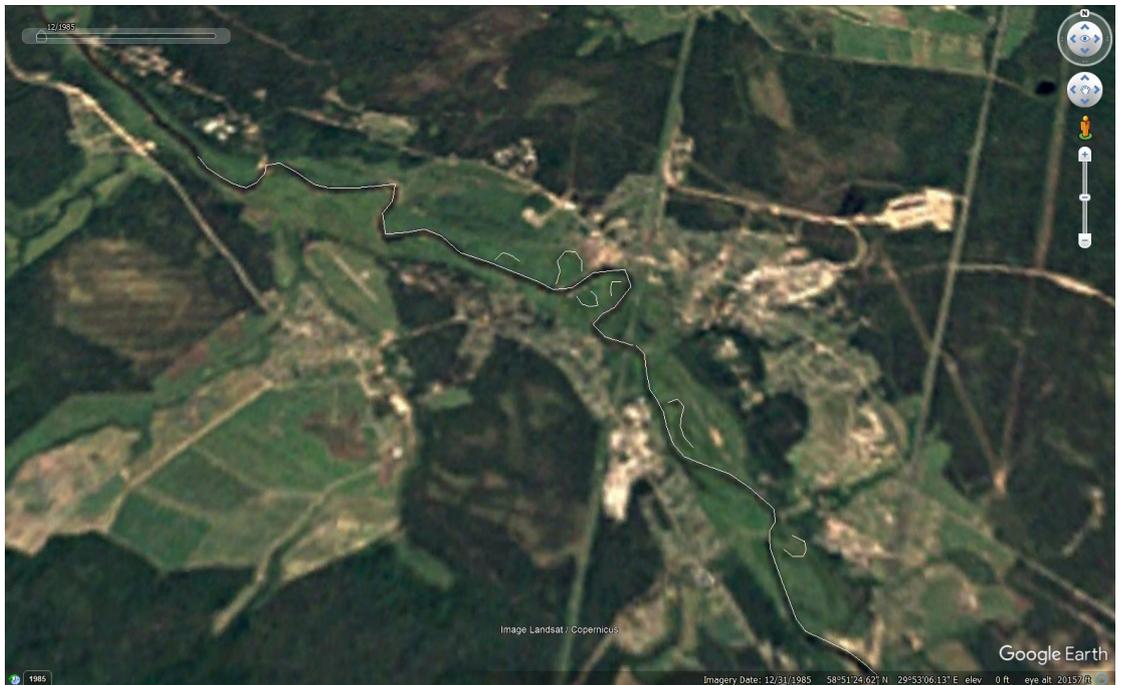


Рисунок 8.6 Снимок 1985 года

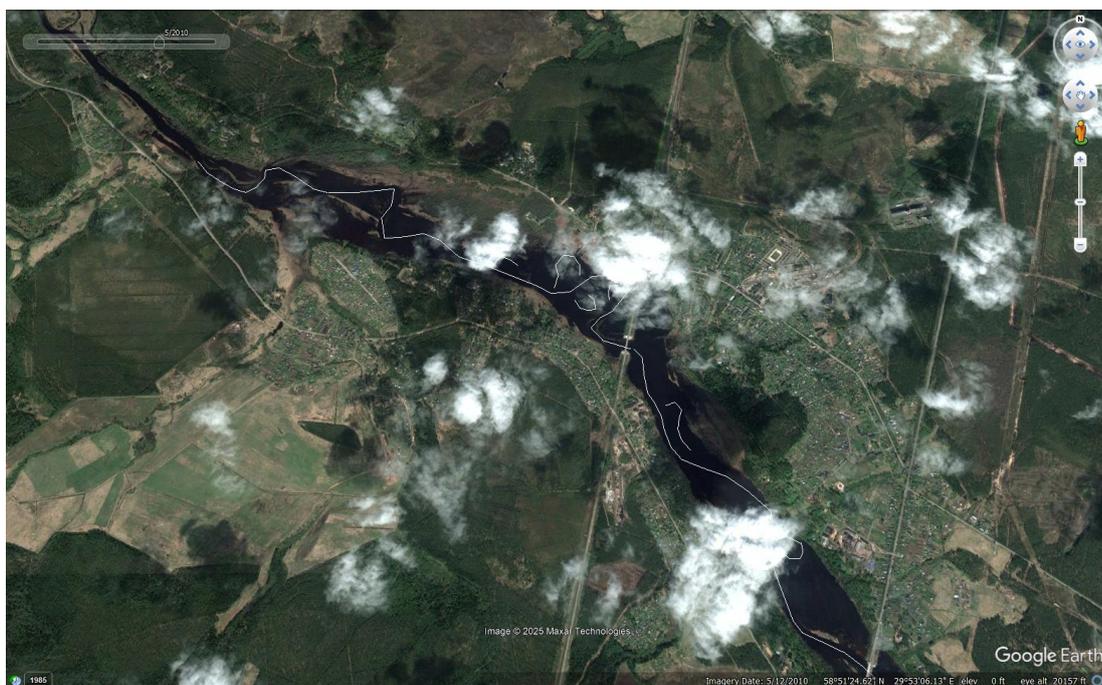


Рисунок 8.7 Снимок 2010 год

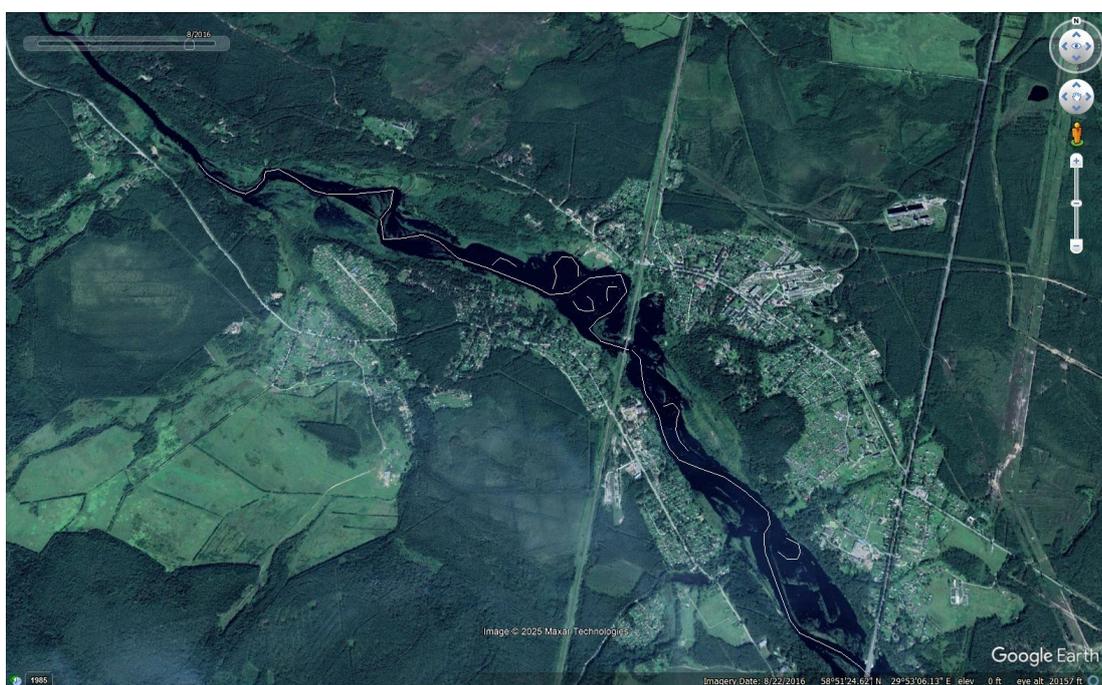


Рисунок 8.8 Снимок 2016 года

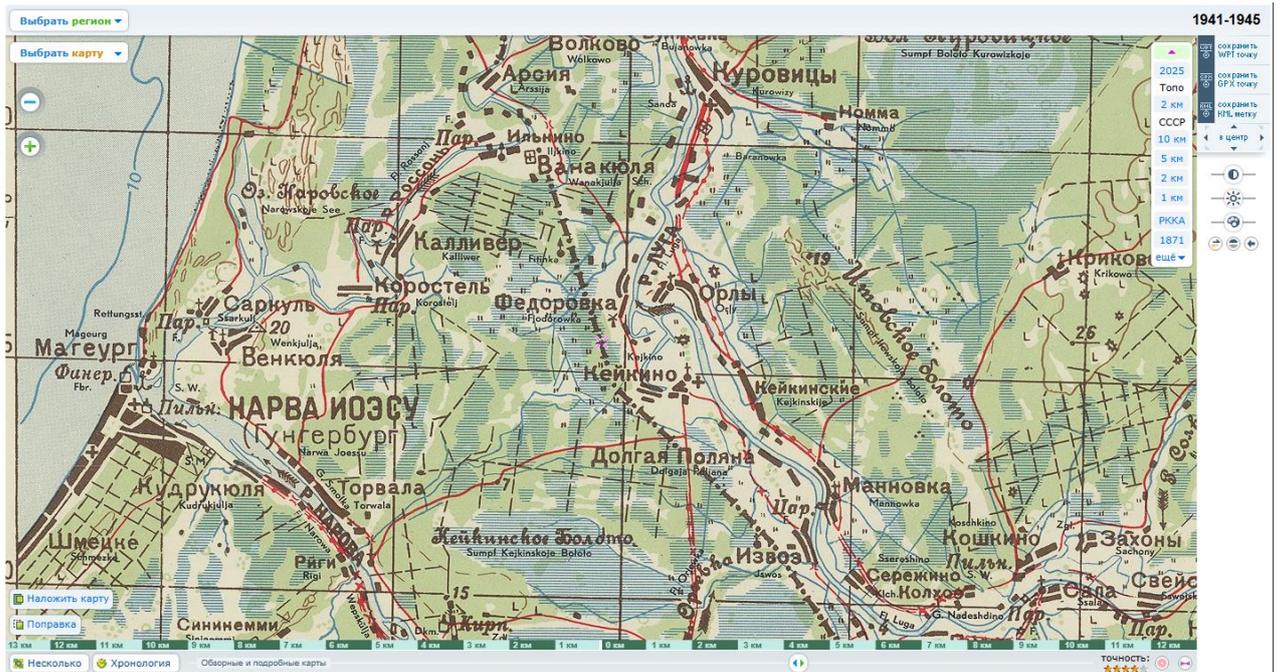


Рисунок 8.9.1 Карта исследуемого района реки Луга (составлена в 1930)

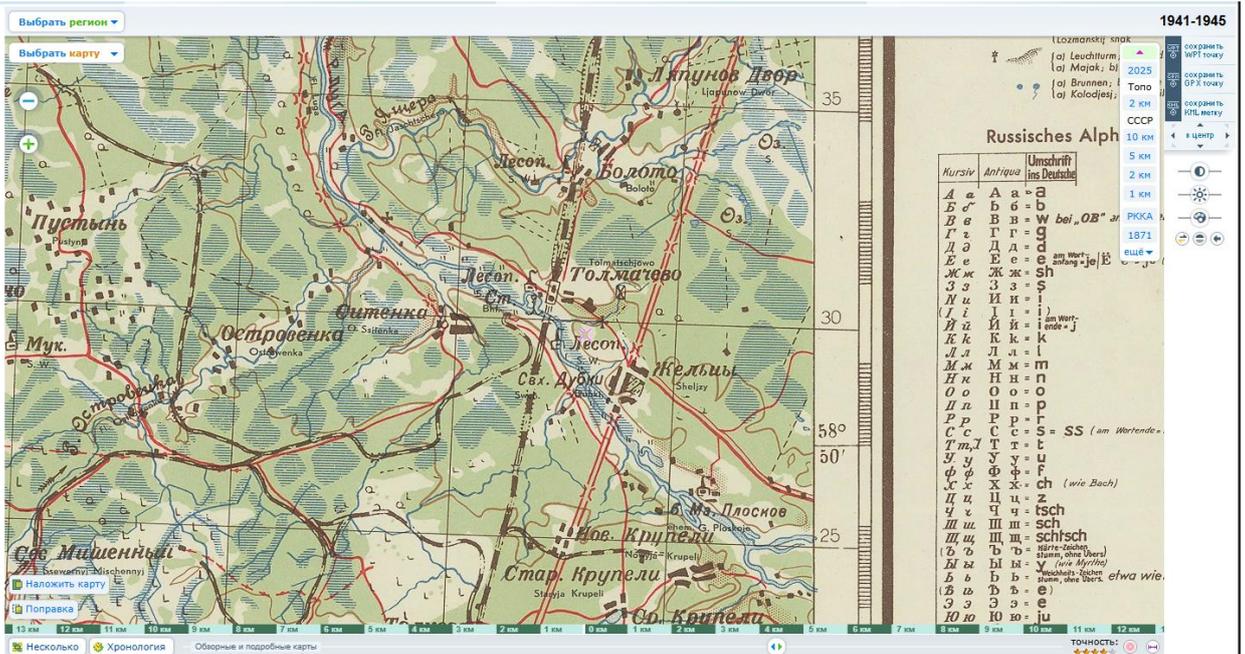


Рисунок 8.9.2 Карта исследуемого района (карта РККА 1941-1945)



## 9. Теоретические основы гидравлического моделирования в HEC-RAS

Программа HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System), разработанная Инженерным центром гидрологии армии США (USACE), представляет собой мощный программный комплекс для моделирования потока воды в естественных и искусственных руслах, в том числе с возможностью учёта затопляемых территорий. HEC-RAS широко применяется как в научных исследованиях, так и в практике инженерной гидрологии, при проектировании гидротехнических сооружений, анализе риска паводков, разработке мероприятий по управлению водными ресурсами [12].

Программа позволяет моделировать как одномерные (1D), так и двумерные (2D) потоки с учётом различных режимов течения: установившегося и неустойчивого, под- и сверхкритического, а также смешанного типа. В 2D-моделях учитывается влияние рельефа местности, неровностей дна, элементов инфраструктуры и других факторов, оказывающих влияние на движение воды. В качестве математической основы HEC-RAS использует систему уравнений Сен-Венана, которые описывают поведение жидкости в открытых руслах. Эти уравнения включают:

Уравнения неразрывности и движения (уравнения Сен-Венана) Для неустойчивого потока (unsteady flow), HEC-RAS использует одномерные или двумерные уравнения Сен-Венана:

Уравнение непрерывности (1D):  $\partial A / \partial t + \partial Q / \partial x = q_1$  где  $A$  — площадь поперечного сечения потока,  $Q$  — расход,  $x$  — продольная координата,  $t$  — время,  $q$  — боковой приток.

Уравнение движения (импульса, 1D):  $\partial Q/\partial t + \partial(Q^2/A)/\partial x + gA(\partial H/\partial x) = gA(S_0 - S_f)$  где  $H$  — пьезометрический уровень,  $S_0$  — уклон дна,  $S_f$  — уклон потерь на трение.

Уравнение непрерывности (2D):  $\partial h/\partial t + \partial(uh)/\partial x + \partial(vh)/\partial y = q$  где  $h$  — глубина потока,  $u$  и  $v$  — компоненты скорости по  $x$  и  $y$ ,  $q$  — боковой приток/сток.

Уравнение движения (2D):  $\partial(uh)/\partial t + \partial(u^2h + 0.5gh^2)/\partial x + \partial(uvh)/\partial y = -gh\partial z/\partial x - \tau_x/\rho$   
 $\partial(vh)/\partial t + \partial(uvh)/\partial x + \partial(v^2h + 0.5gh^2)/\partial y = -gh\partial z/\partial y - \tau_y/\rho$  где  $z$  — отметка дна,  $\tau_x$  и  $\tau_y$  — касательные напряжения,  $\rho$  — плотность воды.

Формула Маннинга (для расчета сопротивления):  $V = (1/n) * R^{(2/3)} * S^{(1/2)}$  где  $V$  — скорость потока,  $n$  — коэффициент Маннинга,  $R$  — гидравлический радиус,  $S$  — уклон энергетической линии.

Уравнение энергии (уравнение Бернулли):  $H = z + y + (V^2 / 2g)$ , где  $H$  — полная энергия,  $z$  — отметка дна,  $y$  — глубина потока,  $V$  — скорость потока,  $g$  — ускорение свободного падения.

HEC-RAS предоставляет инженеру возможность самостоятельно выбирать численный метод для расчётов, ориентируясь на задачи моделирования и особенности конкретного участка местности. Такой выбор особенно важен, когда нужно найти баланс между точностью результатов и скоростью выполнения вычислений.

В ряде ситуаций, особенно если поток развивается медленно, без резких колебаний и сложной динамики, можно использовать схему под названием Diffusion Wave. Это упрощённый вариант расчёта, при котором из уравнений движения исключаются инерционные слагаемые. Иными словами, считается, что ускорение потока не оказывает существенного влияния, и можно сосредоточиться на гравитационных и сопротивляющих силах. Такое допущение допустимо, когда моделируется, например, равнинный паводок или поверхностный сток после дождя.

Применение этой схемы позволяет существенно сократить время расчёта, что важно при выполнении серии сценариев или при анализе

обширных территорий. Однако важно понимать ограничения метода. В тех случаях, когда поток развивается быстро, появляются резкие изменения уровня воды или высокие скорости — особенно рядом с плотинами, шлюзами и другими сооружениями — такая схема может дать значительную погрешность. Тогда лучше использовать более сложную схему, например, Dynamic Wave, которая учитывает всю физику движения воды, включая инерционные эффекты.

## 10. Подготовка исходных данных и построение расчётной модели в HEC-RAS.

Программа HEC RAS 6.6 позволяет моделировать течение реки её скорость и поток, а так же можно добавить такие параметры, как почвенный покров. Необходимо иметь цифровую модель рельефа изучаемого участка русла реки [12].

Для начала работы потребовалось найти или скачать готовый .tif файл данной области был взят участок возле города Луги и загружен в Hec RAS в формате GEOTIFF. На рисунке 10.1 представлен RAS MAP в котором нам и необходимо работать и где будут представлены данные расчета.

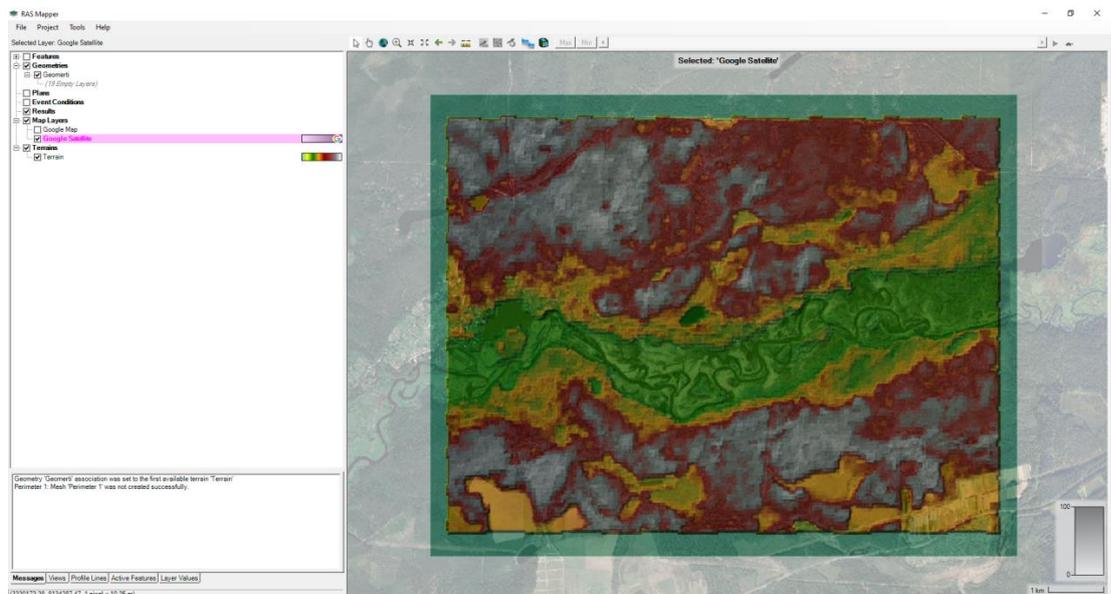


Рисунок 10.1 Программа Hec RAS (RAS MAPPER)

Но перед добавлением входного tif файла потребовалось перепривязать систему координат для автоматического распознавания территории в программе HEC RAS.

Добавление входного растра происходит по следующему пути, создается новый проект в отдельной папке, после создания мы должны изменить систему координат в самой HEC RAS представлено на рисунке 10.2

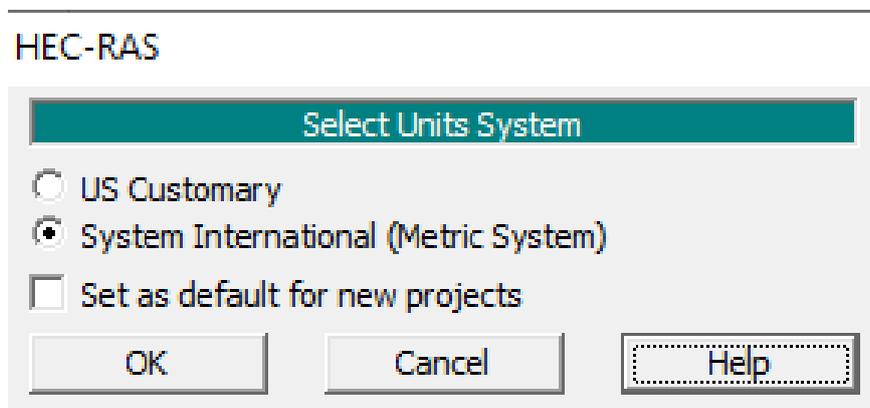


Рисунок 10.2 Основной каталог программы

Делается это в программе HEC RAS, в настройках системы

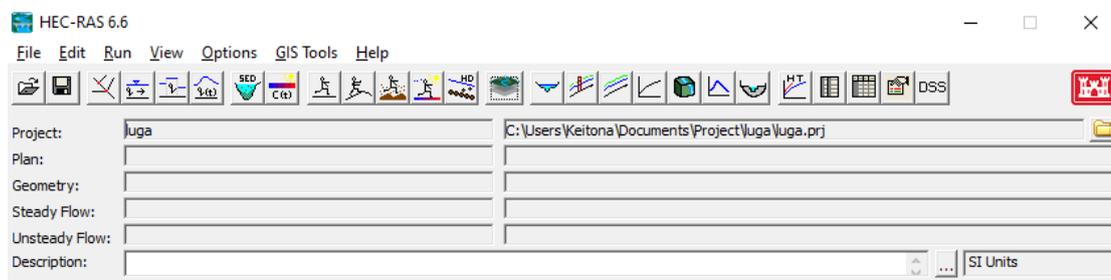


Рисунок 10.3 Выбор системы единиц измерения

На этапе предварительной настройки проекта необходимо перейти в раздел Options → Unit System (см. рисунок 10.3) для выбора системы единиц измерения, соответствующей требованиям моделирования. После этого становится возможной загрузка рабочей TIN-модели, что и было реализовано в рамках текущего проекта.

В исходной программе, интерфейс которой представлен на рисунке 10.3, следует нажать на кнопку слоя (Open RAS Mapper to view maps and data spatially), что открывает модуль пространственной визуализации — RAS Mapper (см. рисунок 10.1). Для загрузки TIN-файла необходимо в открытом проекте в панели слева кликнуть левой кнопкой мыши по пункту Terrains, после чего выбрать опцию Create New RAS Terrain, позволяющую создать новую цифровую модель рельефа на основе предварительно подготовленных данных.

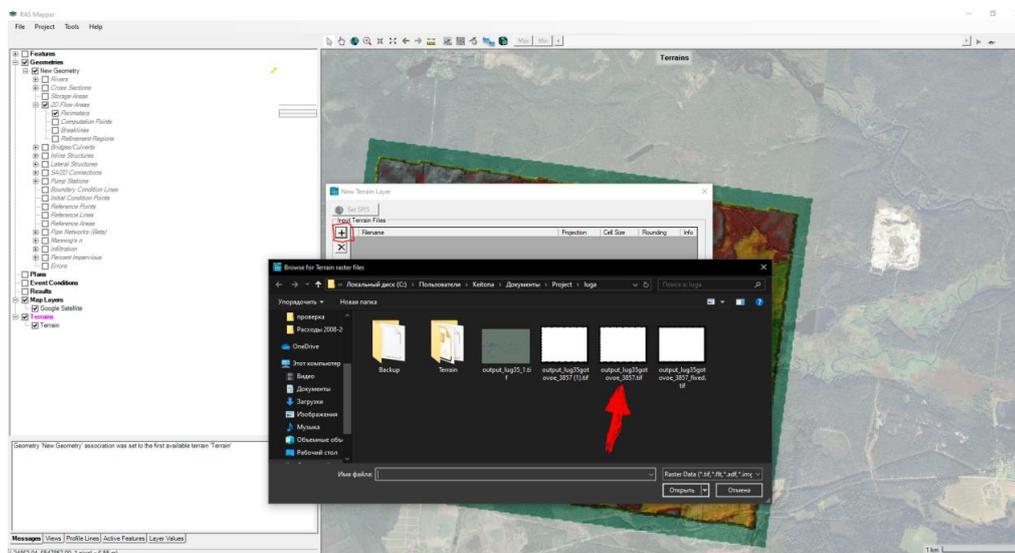


Рисунок 10.4 Создание новой цифровой модели

Появляется меню где мы и можем выбрать заранее приготовленную модель объекта и дальше загрузить, ее в проект после того как мы ее добавили можно, перейти к добавлению гугл карты для визуализации. Так как мы собираемся моделировать поток русла мы должны использовать 2d геометрию, в которой указываем расчетную область. Расчетной областью у

нас является территория на нашей tin модели, которую мы загрузили ранее, она представляет собой уже привязанную координатную сетку с высотами, заметим что все измерения у нас происходят в метрической системе. Так переходим к постройке 2D области ее можно сделать в Edit > Geometric Data или непосредственно в самом RAS MAP, где мы должны создать новую папку. Моделирование потока это функция в 2d flow area ставим галочку напротив нее, дальше открывается выбор пунктов которые мы в первую очередь должны сделать, периметр рассчитанной области по характерному рельефу, береговую линию, а так же направление течения русла. После того как мы это сделаем, мы должны указать входные данные, коем являются входные расходы воды, по гидросту г.Луга, которые вбиваются в ручном режиме перед моделированием потока русла. Данная программа не показывает плановые изменение русла, но по вектору скоростям, продольным профилям и местам осаждения наносов можно сделать вывод, где будет происходить размыв и смещение русла.

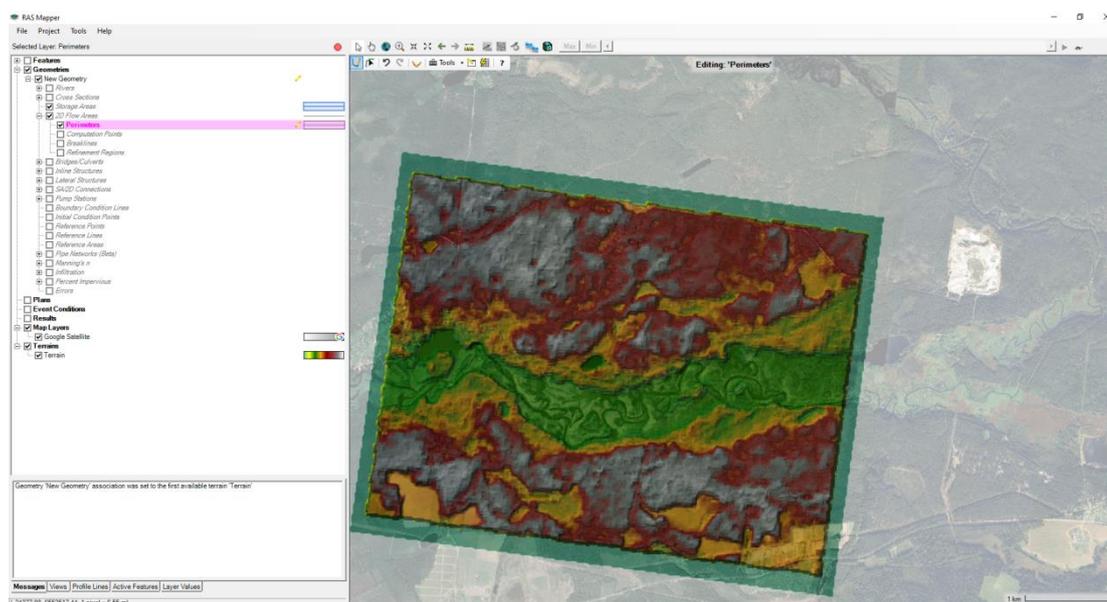


Рисунок 10.5 2d модель в рабочем пространстве Ras Mapper

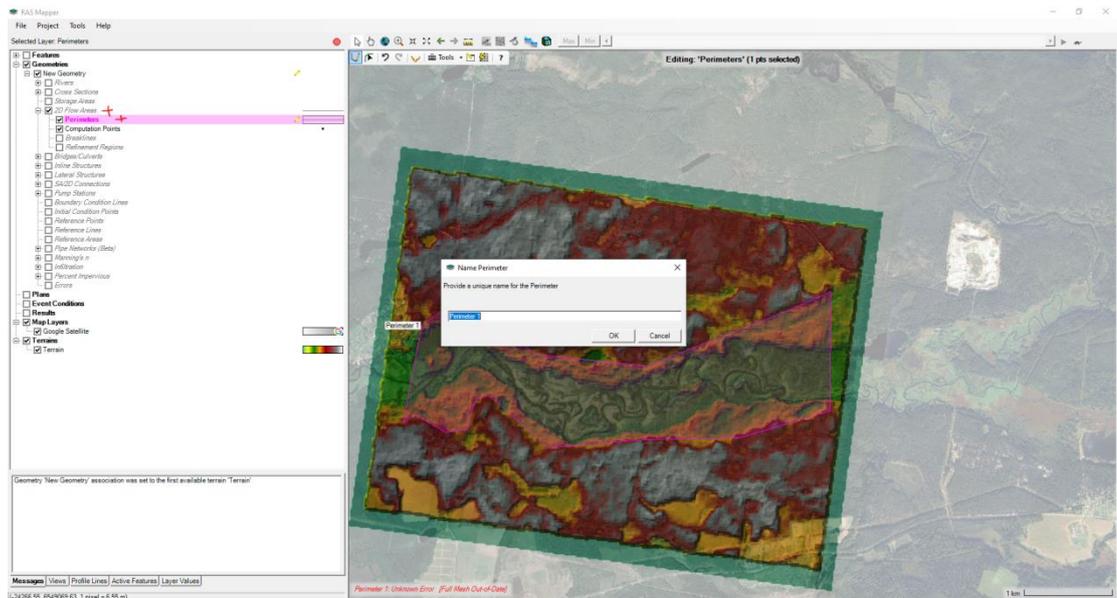


Рисунок 10.6 Назначение имени расчетной области

Далее сохраняем данную область двойным нажатием и пишем любое название было выбрано стандартное название, Parameter 1, после чего жмём на окей и переходим к дальнейшим действиям.

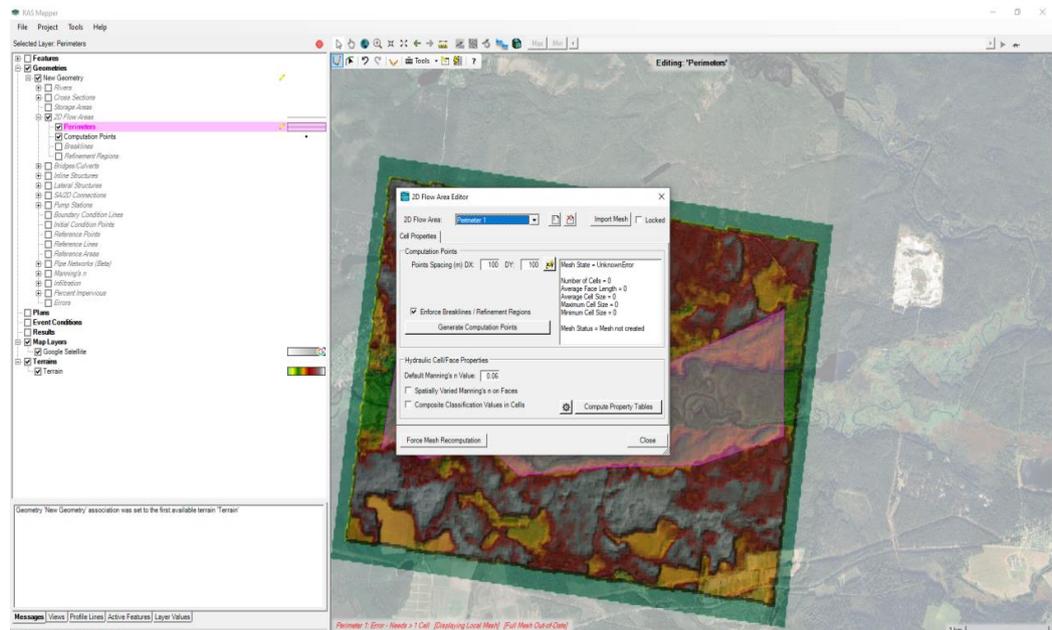


Рисунок 10.7 2dflow анализ

Тут мы указываем шаг сетки и выбираем коэффициент майнинга для нашей работы достаточно усредненного значения, но для более детальной работы необходимо использовать несколько областей с разными коэффициентами майнинга и различной сетки, шаг сетки для данной работы будет достаточно от 5-10, это достаточно для выполнения научно исследовательской работы. После чего нажимаем на генерацию клеток, он считает площадь и количество точек и выводит это в окне справа.

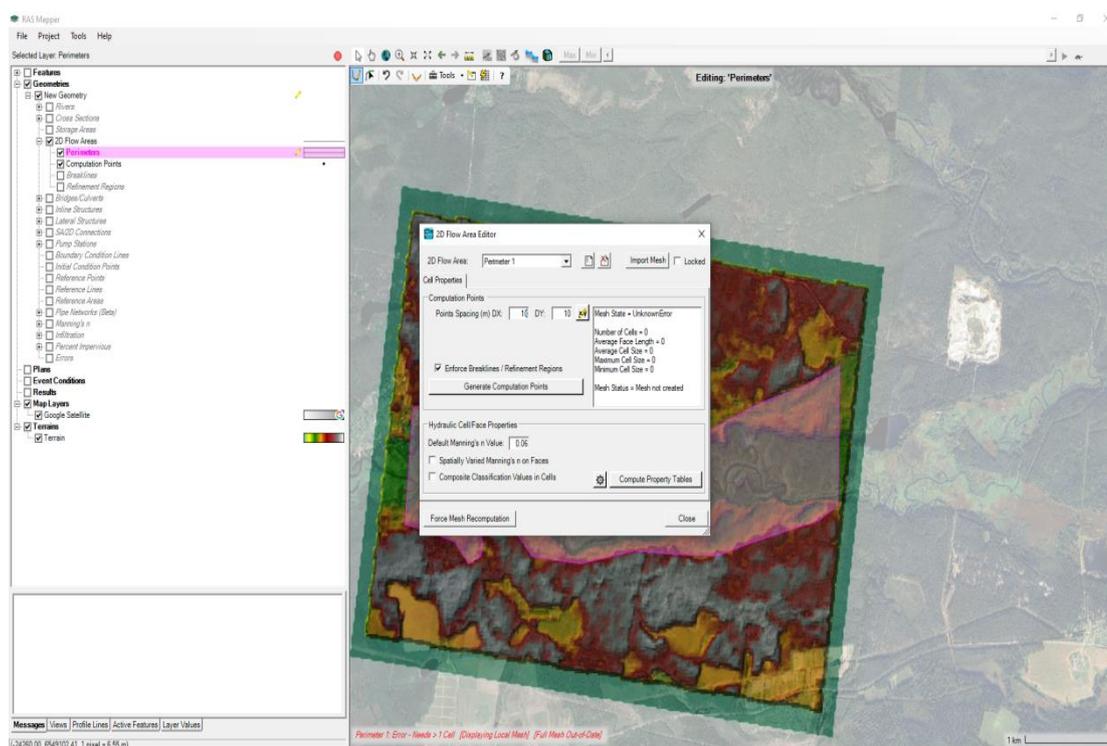


Рисунок 10.8 Задача шага расчетной сетки

После завершения построения расчетной сетки рисунок 2.8 и задания гидравлических характеристик области моделирования, следующим этапом становится определение граничных условий. В HEC-RAS 2D (версии 6.6 и выше) это осуществляется через функцию Boundary Conditions Lines (BC Lines), где задаются начальные и

граничные условия, необходимые для запуска нестационарного расчета потока.

Ключевыми граничными условиями являются параметры, описывающие поведение потока на входе (upstream) и выходе (downstream) расчётной области. Для верхней границы (upstream) чаще всего заедается временной ряд расхода (hydrograph), отражающий поступление воды во времени. Для нижней границы (downstream) может быть задан либо расход, либо уровень воды (stage), в зависимости от имеющихся данных и задач моделирования. Эти значения вносятся в модуль Unsteady Flow Data, где пользователь формирует набор сценариев, включающих временные ряды, привязанные к соответствующим ВС линиям. HEC-RAS требует точного согласования между геометрией модели, линиями граничных условий и входными гидрологическими данными, чтобы обеспечить корректность численного расчета.

Указанные условия не только определяют поведение модели в начальный момент времени, но и существенно влияют на устойчивость и точность расчета во всем интервале моделирования. Согласно руководству пользователя HEC-RAS (U.S. Army Corps of Engineers, 2021), особое внимание следует уделять сглаженности временных рядов и физической обоснованности заданных значений, поскольку резкие колебания могут привести к численным неустойчивостям.



Все изменения должны быть сохранены в основном каталоге проекта, где размещаются остальные связанные с моделью файлы. Убедившись в корректности сохранения, следует перейти в основной модуль гидравлического моделирования — Unsteady Flow Analysis.

На данном этапе требуется задать параметры временного интервала моделирования, строго соответствующие диапазону данных по гидрографу расходов и уровням воды, представленным в исходных гидрологических файлах. Это обеспечит согласованность входных условий модели и предотвратит ошибки, связанные с некорректным временным охватом расчетного периода. После ввода начальной и конечной дат моделирования необходимо запустить численный расчет, нажав кнопку Compute, как показано на рисунке 10.9.1.

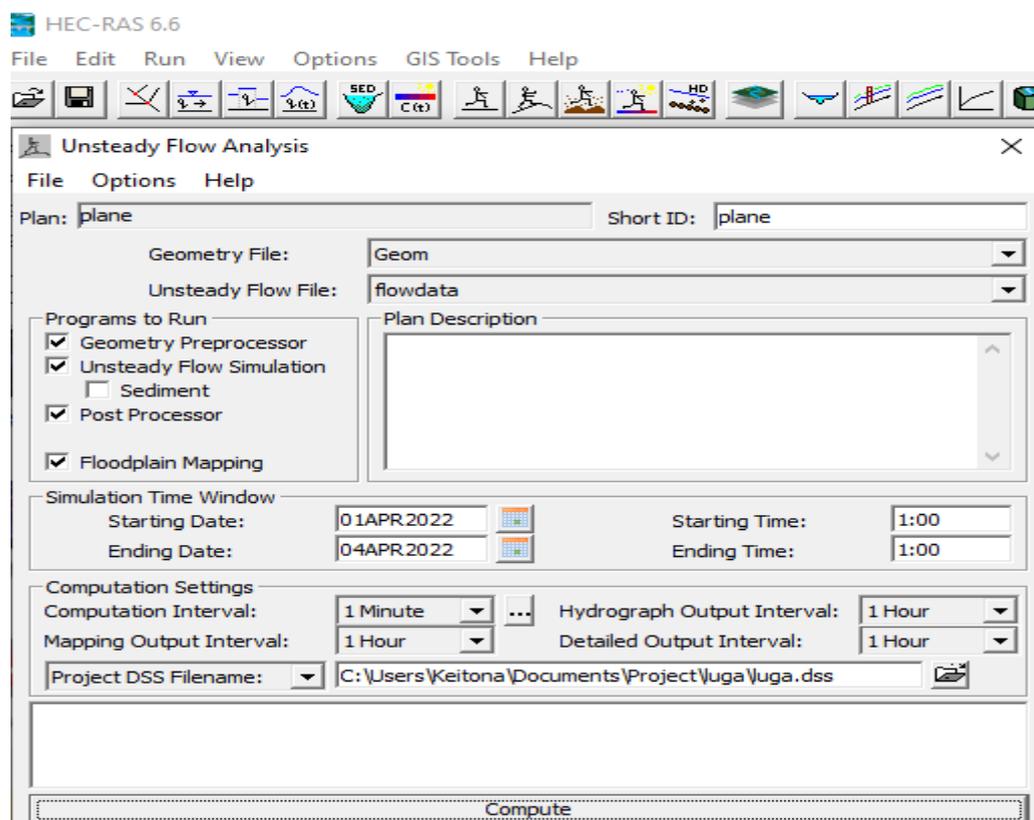


Рисунок 10.9.1 Запуск численного расчета

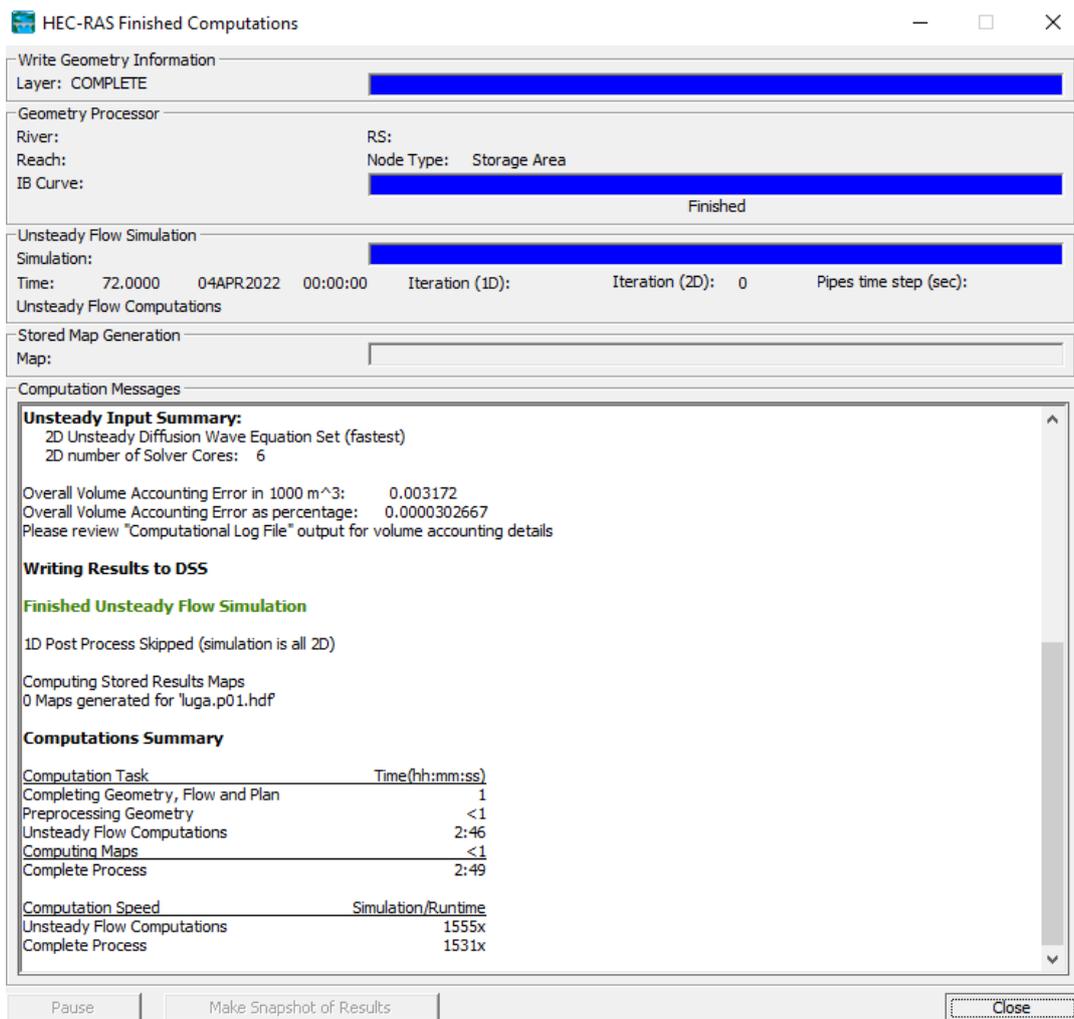


Рисунок 10.9.2 Уведомление о выполнении расчета

На представленном рисунке 10.9.2 мы видим, что расчёты проводились с применением набора уравнений 2D Unsteady Diffusion Wave Equation Set, . Таким образом, полученные результаты демонстрируют высокую точность и стабильность расчёта, что подтверждает корректность заданных граничных условий и качественную настройку численной схемы.

Полученный результат мы можем посмотреть, перейдя в RAS MAPER, как показано на рисунке 10.9.3

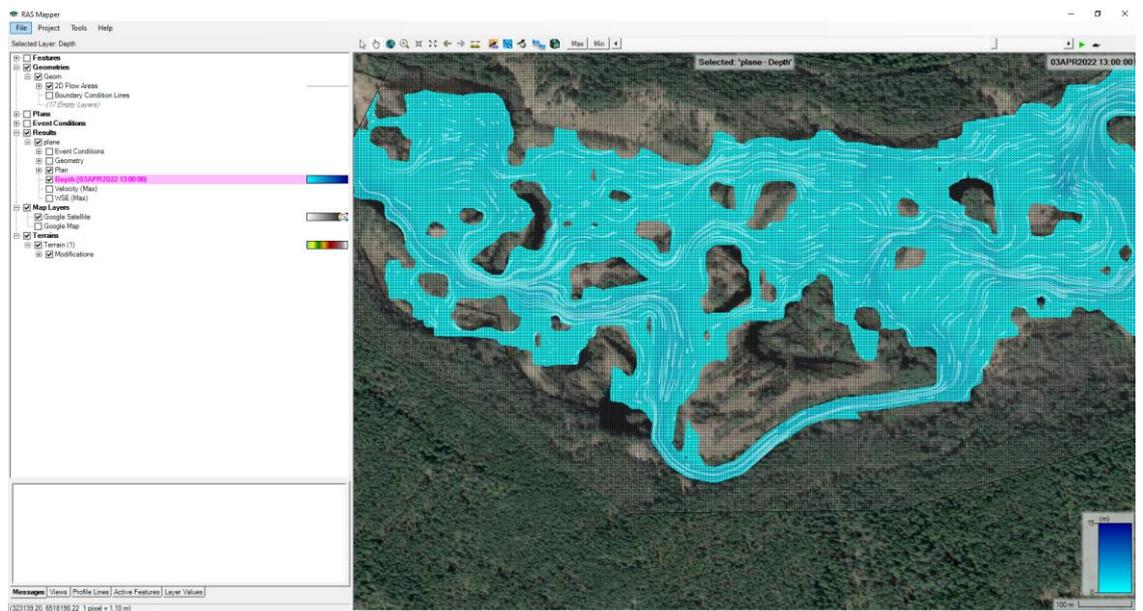


Рисунок 10.9.3 Полученная расчетная модель потока

Из-за неточного моделирования на выбранном участке было принято решение изменить участок следования, взяв участок реки выше по течению, возле населенного пункта Толмачово. Но для начала моделирования была сделана модель установившегося потока и представленного на рисунке 10.9.4-10.9.6

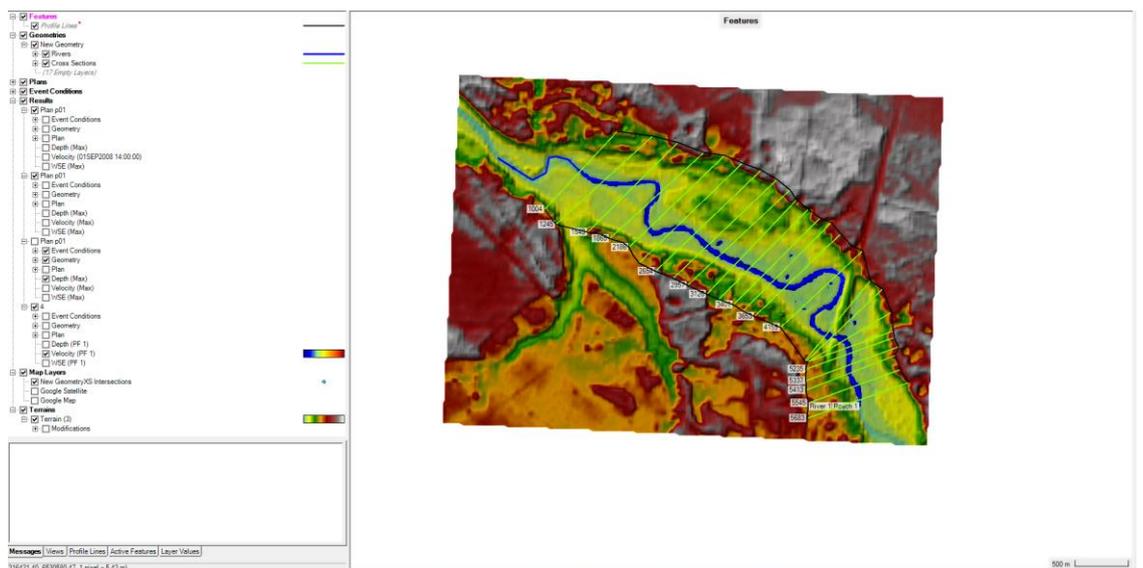


Рисунок 10.9.4 Модель потока при низком уровне

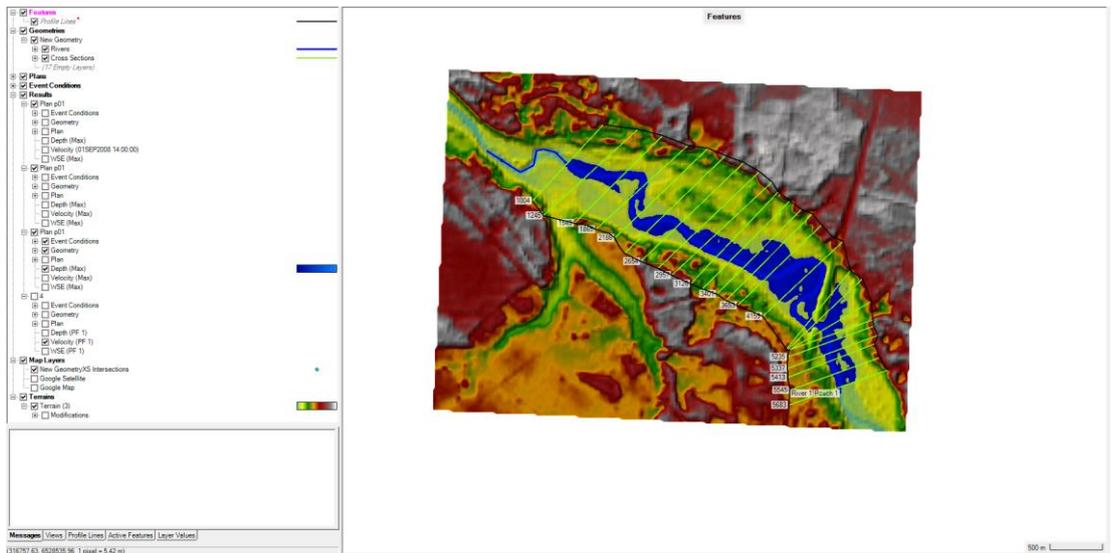


Рисунок 10.9.5 Модель потока при среднем уровне воды

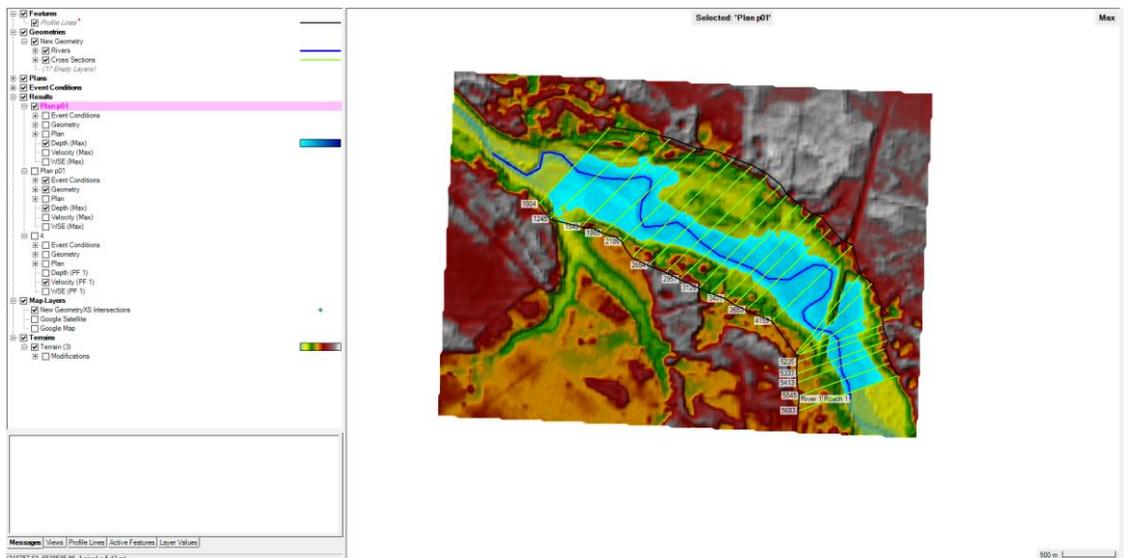


Рисунок 10.9.6 Модель потока при максимальном уровне воды

Так же были построены линии поперечного профиля, по которым производится расчёт необходимый для составления кривых  $Q(H)$  представленных на рисунке 10.9.7-10.9.9. Это несоответствие свидетельствует о том, что расчётная модель не в полной мере учитывает коэффициент шероховатости, заиленных мест или гидротехнических сооружений, как мостовой переход расположенный выше расчётного створа.

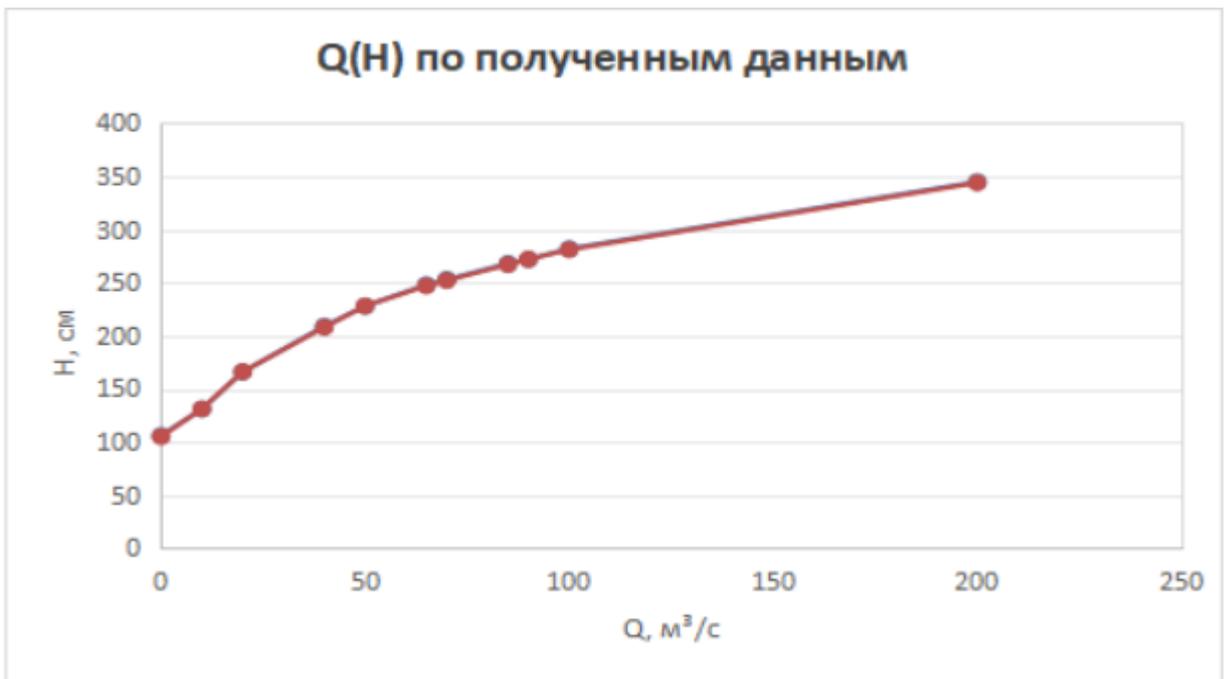


Рисунок 10.9.7 График зависимости расходов от уровня

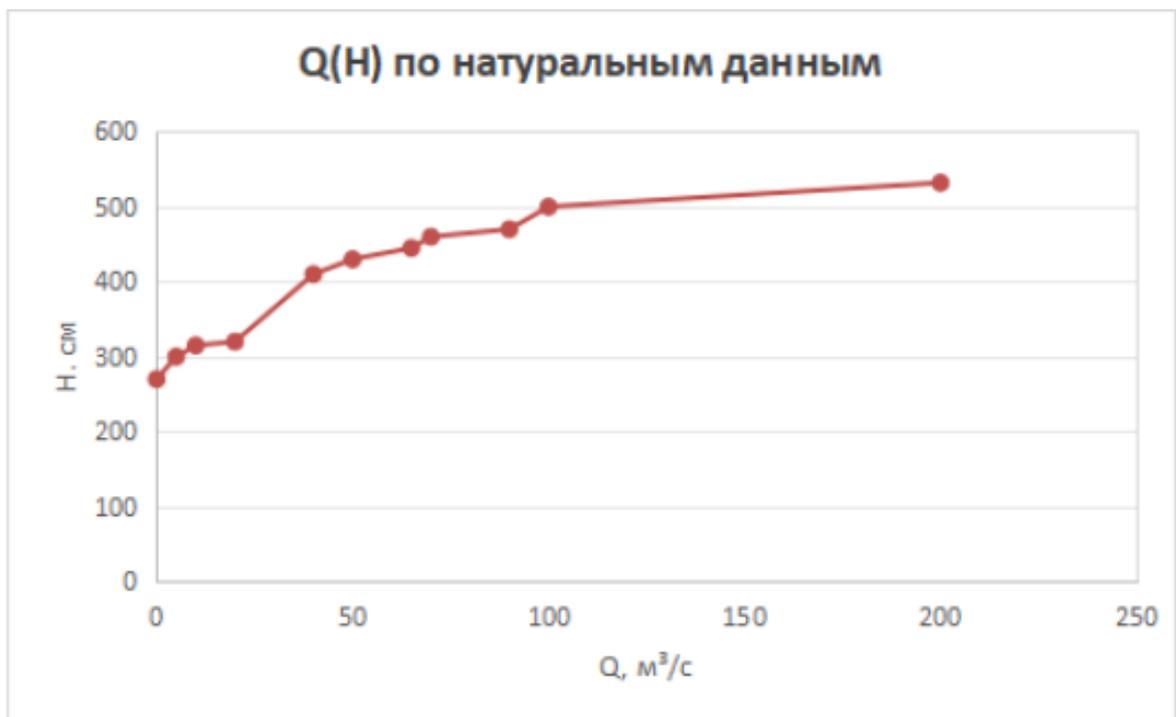


Рисунок 10.9.8 График зависимости расходов от уровня

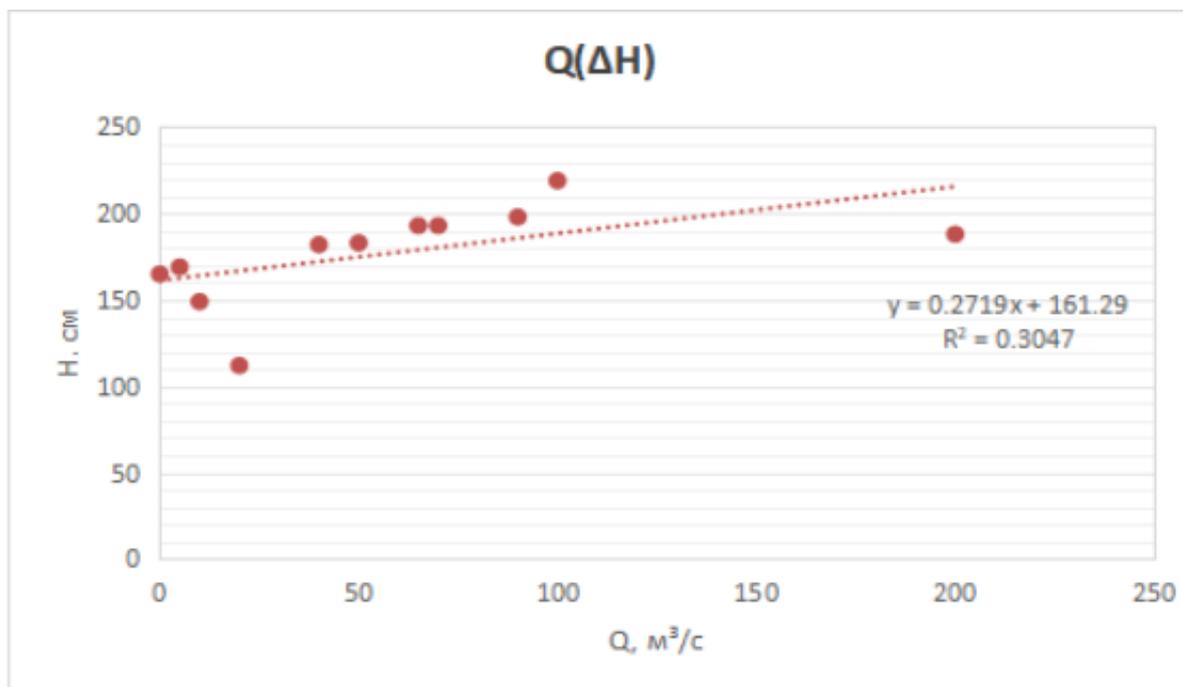


Рисунок 10.9.9 График

Анализ представленных графиков  $Q(H)$ , созданная в программной среде типа HEC-RAS, существенно недооценивает уровни воды по сравнению с фактическими наблюдениями. Расчётная зависимость представленная на рисунке 10.9.7 характеризуется плавным и теоретически корректным ростом уровня с увеличением расхода, тогда как натурные данные (рис.10.9.8) демонстрируют более высокий уровень воды при тех же расходах, особенно в диапазоне средних и высоких расходов.

## Заключение

Анализируя модель потока русла, можно сделать вывод о характере деформаций русла на выбранном участке реки Луга в районе поселка Толмачёво Ленинградской области. Анализ проводился с использованием гидродинамической модели HEC-RAS версии 6.6, которая позволила оценить параметры потока, формы русла и возможные изменения гидроморфологических характеристик в различных режимах течения. В процессе исследования были получены следующие модели:

Unsteady Flow Analysis (анализ неустановившегося потока) — позволил смоделировать динамику изменения уровня воды и скоростей течения во времени. Этот тип анализа особенно важен для оценки паводковых ситуаций, быстрого притока воды и их влияния на русловые процессы. В результате моделирования были определены участки с потенциальной эрозией русла и зоной аккумуляции наносов, выявлены возможные риски выхода воды за пределы русла при экстремальных гидрологических событиях.

Steady Flow Analysis (анализ установившегося потока) — использовался для определения устойчивых характеристик потока при постоянных расходах. Он позволил выявить критические сечения, в которых происходит резкое изменение глубины или скорости, а также определить участки с повышенной склонностью к обмелению или углублению. Модель установившегося потока также применялась для калибровки геометрии русла и проверки соответствия гидравлических параметров фактическим данным.

Было установлено, что основное русло реки Луги на значительном протяжении сохраняет наследуемую, исторически сложившуюся траекторию, вероятно сформировавшуюся в условиях, как и многие другие водотоки Северо-Запада России, в позднплейстоценовое —

раннеголоценовое время, то есть примерно 10–12 тысяч лет назад. В среднем течении реки наблюдаются высокие значения коэффициента извилистости ( $P/\lambda$ ).

## Список использованных источников

1. Большаков В. А. Гидрология суши: учебник / В. А. Большаков. — М.: Академия, 2019. — 352 с.
2. Добровольский А. Д. География растительности с основами экологии растений / А. Д. Добровольский. — М.: Изд-во МГУ, 2018. — 416 с.
3. Добрецов Н. Л. Гидрологические исследования: методология и практика / Н. Л. Добрецов. — Новосибирск: Наука, 2016. — 328 с.
4. Каган Л. М. Климатология: учебное пособие / Л. М. Каган, И. С. Шакун. — СПб.: РГГМУ, 2020. — 278 с.
5. Климатические данные по Ленинградской области / Росгидромет. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.meteo.ru/> (дата обращения: 28.03.2025).
6. Лаппо Г. М. География России: природа и население / Г. М. Лаппо. — М.: Просвещение, 2017. — 303 с.
7. Основы инженерной гидрологии: учебник / под ред. Ю. И. Чеботарёва. — М.: Колос, 2021. — 398 с.
8. Плюснин Ю. М. Инженерная геология: учебное пособие / Ю. М. Плюснин. — М.: Лань, 2020. — 310 с.
9. Речные излучины, Р.С. Чалов, А.С. Завадский, А.В. Панин, из-во МГУ, 2004г
10. Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов / Под ред. Н.И. Маккавеева. М., Изд-во МГУ, 1979, 232 с.
11. Финаров Д. П. География Санкт-Петербурга и Ленинградской области: учебное пособие / Д. П. Финаров. — СПб.: «специальная литература», 1996. — 160 с.
12. HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System): Руководство пользователя / U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. — Version 6.4, 2023. — [Электронный ресурс]. — доступ: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/> (дата обращения: 19.01.2025).