



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

Кафедра гидрометрии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему Изменение руслового процесса
на малых реках на примере р. Порусья

Исполнитель Виноградов Иван Алексеевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель Доцент кафедры гидрометрии
(ученая степень, ученое звание)

Гаврилов И. С.
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

К. Г. Н.
(ученая степень, ученое звание)

Исаев Д. И.
(фамилия, имя, отчество)

 2018 г.

Санкт-Петербург
2018

Оглавление

Введение	3
Цель.....	3
1.1 Административное положение	5
1.2 Климатические условия.....	6
1.3 Рельеф и геологические условия	10
1.4 Гидрография	11
2. Основная часть	13
2.1 Плановые деформации на р. Порусья	13
2.2 Глубинные деформации на р. Порусья	26
2.3 Расчет глубины и ширины размыва грунта.....	29
2.4 Оценка результатов моделирования	35
Ошибка на карте 1932 года в Пирогово.....	39
Вывод.....	44
Список использованной литературы.....	45

Введение.

При проектировании любых гидротехнических сооружений, располагающихся на реках, либо пересекающих их, проектировщикам необходимо учитывать плановые и глубинные деформации реки.

Плановые и глубинные деформации – естественный процесс, свойственный любой реке. Скорость размыва берегов колеблется от долей метра до десятков метра в год, изменчива от половодья к межени, от года к году в зависимости от стадии развития процесса, который возникает, активизируется, затухает, прекращается и вновь возобновляется (1). Скорость глубинных деформаций – от долей сантиметра до нескольких метров. Зависит скорость размыва берегов и дна от скорости течения, геологического строения берегов и русла, от расположения стрежня (берега размываются лишь когда стержень находится у берега). Согласно теории русловых процессов, русло реки изменяется в плане из-за постепенного размыва берегов. Построив мост над рекой, или расположив водозабор, должна быть уверенность, что данное гидротехническое сооружение будет работать весь заявленный срок эксплуатации, а не будет размыто в ближайшее время.

В данной работе рассчитаны русловые деформации реки Порусья с использованием топографических карт XIX-XX века, проведена оценка эффективности использования методики для определения плановых и глубинных русловых деформаций, изложенной в [2], рассчитана скорость размыва аллювиальных грунтов по формуле и представлены результаты опыта, целью которого было измерение скорости размыва.

Цель:

Оценить интенсивность плановых и глубинных деформаций реки Порусья. Определить, изменяется ли русловый процесс с течением времени.

Задачи:

С помощью картографического материала рассчитать плановые деформации реки Порусья по методике, изложенной в п. 6.1 [2]. Оценить эффективность методики, сравнив полученные значения с измеренными.

С помощью картографического материала рассчитать высотные деформации реки Порусья, сравнить полученные значения с данными инструментальных наблюдений.

Рассчитать и измерить скорость размыва грунтов, сравнить результаты.

1. Физико-географическая характеристика района

1.1 Административное положение

Территория исследований находится в Новгородской области, в Старорусском и Поддорском районах.

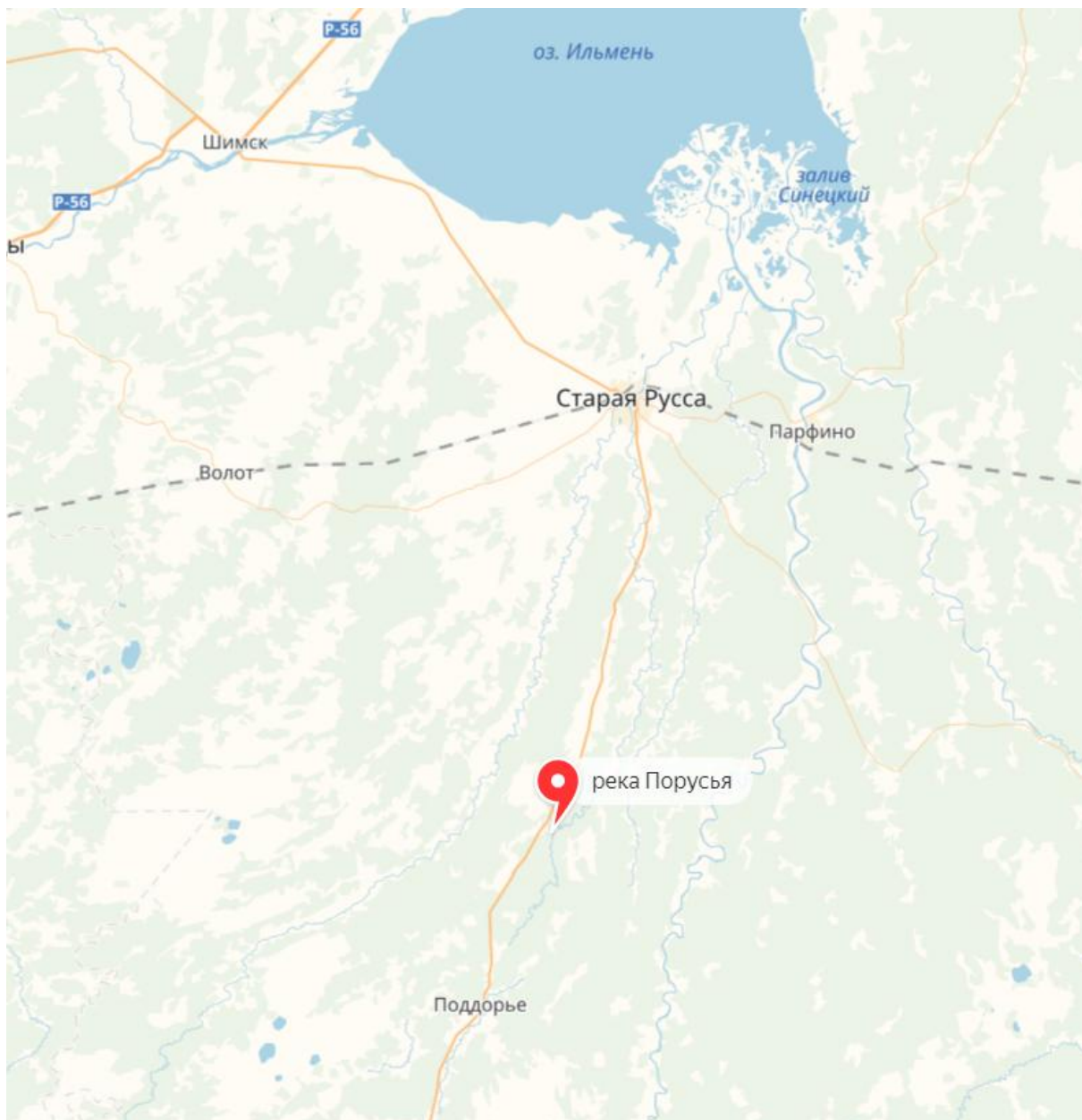


Рисунок 1 – Район исследований.

Исток реки Порусья находится на территории Рдейского заповедника в Бежаницком районе Псковской области. Вытекает река из Рдейского болота, далее течет по двум районам Новгородской области: Поддорскому и Старорусскому, и впадает в реку Полисть в черте города Старая Русса.

1.2 Климатические условия

Климат бассейна реки Порусья умеренный переходящий от морского к континентальному. Для него характерна мягкая зима со значительными колебаниями температуры, которые иногда приводят к оттепелям, преимущественно пасмурная погода с большим количеством выпадающих осадков, а так же частые туманы. Весна, затяжная и прохладная, часто возвращаются холода, приносящие твёрдые атмосферные осадки и повторное установление снежного покрова. Лето так же характеризуется невысокой температурой, по сравнению с отдаленными от моря районами. Осень наоборот более тёплая и мягкая, за счёт медленно остывающего Финского залива и озера Ильмень, к концу осени, когда температура воздуха понижается, возрастают скорость ветра и облачность, чаще возникают туманы, в это время года наблюдается наибольшая повторяемость штормов.

Радиационный режим

В течение большей части года (с апреля по октябрь) радиационный баланс района положителен. Среднее значение годового радиационного баланса изменяется в пределах 130 – 150 кДж/см² или 40-45% суммарной радиации. Период с положительным радиационным балансом начинается в третьей декаде марта и заканчивается в начале ноября. Наибольшие значения радиационного баланса отмечаются в мае – июле, составляя 30 – 35 кДж/см², наименьшие в декабре – январе 2 – 5 кДж/см². Сумма отрицательного баланса составляет в среднем 8 – 13 кДж/см².

Ветер

Циркуляционные процессы региона характеризуются активной циклонической деятельностью с быстрым переносом воздушных масс атлантического происхождения, несущих дождливую погоду. Циклоническая циркуляция наблюдается около 200 дней в году. Господствуют ветры широтного переноса, с которыми приходят воздушные массы умеренных широт – около 80 %, арктические массы от 6 до 17 %, и только 1 % - тропические воздушные массы.

Средняя годовая скорость ветра – 4,7 м/с. Наибольшие средние месячные скорости ветра наблюдаются в ноябре и декабре, а наименьшие - в июле и августе. Наиболее часто отмечаются ветры со скоростью 4 – 8 м/с (45,34 %). Повторяемость в течение года штормовых ветров 14 – 20 м/с составляет 1,33 – 1,21 %, а штилевой погоды - 6,68 %. За год в рассматриваемом районе в среднем наблюдается 18 дней с сильным ветром (15 м/с и более).

На протяжении года преобладают ветры южного, юго-западного и западного направлений. Их повторяемость достигает 50 %. Чаще всего они регистрируются в холодный период года. В летние месяцы повторяемость южных ветров снижается – это хорошо видно по розам ветров (рис 2)



Рисунок 2 – Розы ветров по многолетним данным метеостанции Старая Русса.

Температура воздуха

Характер переноса воздушных масс обуславливает довольно высокие средние месячные температуры воздуха и их небольшую годовую амплитуду. В таблице 1.2.1 представлены среднемесячная и среднегодовая температура воздуха - $+4,3^{\circ}\text{C}$; самым теплым месяцем является июль ($17,7$), но возможны похолодания до $1 - 7^{\circ}\text{C}$ и отдельные повышения до $30 - 34^{\circ}\text{C}$; самым холодным – январь ($-8,3^{\circ}\text{C}$), возможны оттепели, во время которых температура поднимается до $3 - 6^{\circ}\text{C}$ [3].

Таблица 1 – Среднемесячная и годовая температуры воздуха, $^{\circ}\text{C}$.

Месяц	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	Год
Температура	-8,3	-8,2	4,2	4	11	15,4	17,7	15,7	10,5	4,6	-0,8	-5,7	4,7

Абсолютный максимум – плюс 34,3°С (август). Абсолютный минимум – минус 42 °С (январь). Средняя дата первого заморозка приходится на 28 сентября, Устойчивый переход средней суточной температуры через нуль происходит в конце марта. Средняя продолжительность безморозного периода - 137 дней, [3].

Влажность воздуха

В таблице 1.2.2 представлены среднемесячная и средняя годовая относительная влажность воздуха в районе, равная 80%. Наибольшая средняя месячная относительная влажность воздуха наблюдается в декабре – 87 %, а наименьшая в мае – 70 %, [3].

Таблица 2 – Значение среднемесячной и годовой относительной влажности воздуха.

Месяц	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	Год
Относит. влажность	86	84	80	73	66	71	76	80	84	86	86	87	80

Осадки

Территория данного региона относится к зоне избыточного увлажнения, что объясняется небольшим приходом тепла и хорошо развитой циклонической деятельностью. В среднем за год выпадает 600 - 700 мм осадков [3]. Более полную картину осадков района можно представить на основании таблицы 1.2.3.

Таблица 3 - Среднемесячное и годовое количество осадков, мм

Месяц	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	Год
Осадки	42	36	37	38	48	70	84	77	67	52	57	49	657

Среднегодовое количество осадков, по данным метеостанции Старая Русса составляет 657 мм. Внутригодовое распределение осадков неравномерное, на теплое время приходится 66% их среднегодовой величины. Среднесуточный максимум осадков составляет 30-35 мм.

Снежный покров

Средняя наибольшая высота снежного покрова составляет 54 см, длительность залегания – до 120 дней. Наибольшей мощности снежный покров достигает в конце февраля – начале марта. Начало снеготаяния приходится на конец марта и продолжается в среднем 10 - 15 дней. Запас воды в снежном покрове от 77 до 86 мм, [3].

Максимальная глубина промерзания почвы в феврале-марте достигает 125 см. На возвышениях и свободных от снежного покрова территориях, глубина промерзания превышает это значение примерно в два раза. На долю сконденсированной влаги приходится до 40 % годового количества осадков [3].

1.3 Рельеф и геологические условия

Рельеф территории сформировался в ледниковый период и носит на себе следы интенсивной ледниковой деятельности. Поверхность района представляет собой низменную равнину со слабым наклоном на север в сторону озера Ильмень. Абсолютные отметки поверхности лежат в пределах 70-20 м абс. Отличительной особенностью территории является обилие рек и мелких озер. Речная сеть хорошо развита: на 1 км² площади приходится 0,3 км рек. В геологическом строении территории города принимают участие коренные породы девона и четвертичные отложения. Девонские отложения представлены песчано-глинистыми породами среднего девона и преимущественно карбонатными породами верхнего девона. Общая мощность

девонских отложений достигает 500м. Повсеместно на рассматриваемой территории распространены бурежские слои верхнего девона. В пределах города они залегают на глубине от 7-8 до 15-18 м и представлены трещиноватыми известняками мощностью до 15-20 м. Подстилаются бурежские слои ильменскими глинами мощностью 18-30 м. Четвертичные отложения повсеместно перекрывают коренные породы девона. Мощность четвертичных отложений в пределах города колеблется от 5 до 15 м. Увеличение мощности идет с юга на север. Мощности более 15 м (15-18 м) приурочены к впадине дочетвертичного рельефа в юго-восточной части города (район существующего курорта). Четвертичные отложения представлены ледниковыми, озерно-ледниковыми, аллювиальными и моренными отложениями верхнечетвертичного возраста. Ледниковые отложения слагают нижнюю часть разреза четвертичных отложений. На дневную поверхность они выходят к западу от города в районе дер. Дубовицы. Ледниковые отложения представлены мореной – валунными глинами и суглинками с маломощными (0,1 – 0,8 м) прослоями линзами мелко- и тонкозернистых песков. Средняя мощность морены составляет 4 – 8 м. Морена перекрывается озерно-ледниковыми отложениями: ленточными глинами и песками. В северной части города (район карьеров кирпичного завода) пески отсутствуют в разрезе озерно-ледниковых отложений и ленточные глины залегают с поверхности. Мощность ленточных глин равна 3 – 4 м, песков 2 – 4 м. Аллювиальные отложения представлены песками различного гранулометрического состава, супесями, реже галечниками и приурочены к долинам рек Полисть и Порусья. Средняя мощность аллювиальных отложений 7-8 м.

1.4 Гидрография

Район исследований включает кроме реки Порусья ещё и часть реки Редья, которая протекает в 10 км от реки Порусья в том же направлении. .

Река Порусья берет начало из Рдейского болота в 35 км на Северо-Запад от города Холм Новгородской области и впадает в реку Полисть в черте города

Старая Русса. Длина реки 175 км, площадь водосбора реки Порусья 1030 км², средний уклон реки составляет 0,51 ‰ .

Основные притоки реки Порусья – Велья, Лютая, Белка и Порусь. Долина реки Порусья в среднем течении имеет хорошо выраженную долину с глубиной вреза 10-15 м. Склоны крутые, высокие, покрытые лесом, кустарником, местами обнажены. Пойма практически не затопливается, ввиду глубокого вреза русла.

Ширина русла реки 6 - 10 м, глубина от 0,2 - 0,5 м на перекатах до 2 м на плесах [4]. Русло реки извилистое, песчано-гравелистое, устойчивое. Средняя скорость течения 0,20 - 0,50 м/с, а в период паводка или половодья на отдельных участках составляет 1 м/с.

2. Основная часть

2.1 Плановые деформации на р. Порусья

В общем случае технический отчет по инженерно-гидрометеорологическим изысканиям должен включать в себя совмещенные планы участков реки по съемкам разных лет для характеристики деформации русла (п.4.37 [5]). Более подробно про расчет плановых деформаций написано в п. 6.1 [2]: «прогноз плановых деформаций русла на заданный срок составляется на основании экстраполяции значений смещения берегов русла, определяемых совмещением планов русла, выполненных с интервалом не менее 5-7 лет». Таким образом, рассчитать скорость размыва берега мы можем лишь наложив топографические планы и карты. Глубинные деформации определяются двумя способами: совмещение поперечных профилей за разные годы и расчет по формуле, учитывающей максимальную высоту гряд. Поперечные профили и русловые съемки в СССР делались часто, однако, большинство этих данных не сохранилось, а оставшуюся часть достать очень трудно. Рассчитывать глубинные деформации по формуле можно, но точность таких расчетов иногда может быть очень низка. Исходя из этого, глубинные деформации русла за достаточно большой можно определить, наложив топографические карты.

Топографический план – это картографическое изображение ограниченного участка местности [6]. Такие планы строятся отдельно для земельных участков, промышленных и строительных объектов. Реки, особенно малые, с высокой точностью никто не снимает. Малые реки [7] детально прорисованы на крупномасштабных картах (1:50 000 и 1: 100 000) только при ширине больше 10 м, частота издания таких картографических материалов редка. В свободном доступе обычно имеются только материалы 20-40 и 70-80 гг. Иногда в интернете можно найти аэрофотоснимки времен Великой Отечественной войны, однако, такие съемки обычно проводились в крупных населенных пунктах. В последнее время широко используются спутниковые

снимки. Однако, в нашей стране найти несколько снимков с разницей в 5-7 лет реально только для крупных городов.

Поэтому накладывать следует крупномасштабные топографические карты. Совмещение планов выполняется по координатной сетке или по не изменяющим своего положения деталям местности (п.6.2 [2]). Для оценки того или иного типа руслового процесса возникает необходимость привлечения более старых картографических материалов. Основные детали местности (мосты, здания) за этот период (19-20 век) претерпели большие изменения, что приводит к большим ошибкам при стандартном подходе.

На старых картах XIX века координатной сетки не было, поэтому есть смысл совмещать карты по характерным точкам. Однако, большинство таких точек найти сейчас на спутниковом снимке либо невозможно, либо очень сложно: церкви, которые есть на старых картах разрушены, от деревень не остается буквально ничего, дороги и крупные перекрестки уже с трудом идентифицируются на фоне выросших на них деревьев.

Проектные сроки эксплуатации железобетонных мостов – не менее 40 лет (источник), ГТС даже низких классов эксплуатируются 50-70 лет и более. Следовательно, есть смысл сравнивать картографические данные за достаточно большие временные промежутки.

Расчет плановых деформаций речных русел с использованием картографического материала и спутниковых снимков.

Участок №1 расположен в 5 км севернее г. Поддоря. Деревня Минцево расположена на левом берегу реки Порусья. (рис. 3)



Рисунок 3 – река Порусья в деревне Минцево. Дата съемки: 16.04.2017

Для расчета плановых и глубинных деформаций были использованы следующие картографические материалы:

1. Топографическая карта О-36-87-В 1932 г. масштаб 1:50000



Рисунок 4 – Топографическая карта О-36-87-В 1932 г

2. Карта губернии Псковской и Новгородской 1880 г Шуберт



Рисунок 5 – Карта губернии Псковской и Новгородской 1880 г

3. Спутниковый снимок ArcGISImagery



Рисунок 6 – Спутниковый снимок ArcGISImagery

4. Подробная топографическая карта Новгородской области 2001



Рисунок 7 – Топографическая карта Новгородской области 2001, ГГЦ

Для определения плановых деформаций необходимо наложить русла рек разных карт, привязав их к характерным точкам на местности. На рисунке 8 наложены русла рек 1880, 1932, 2001 и 2017 годов.

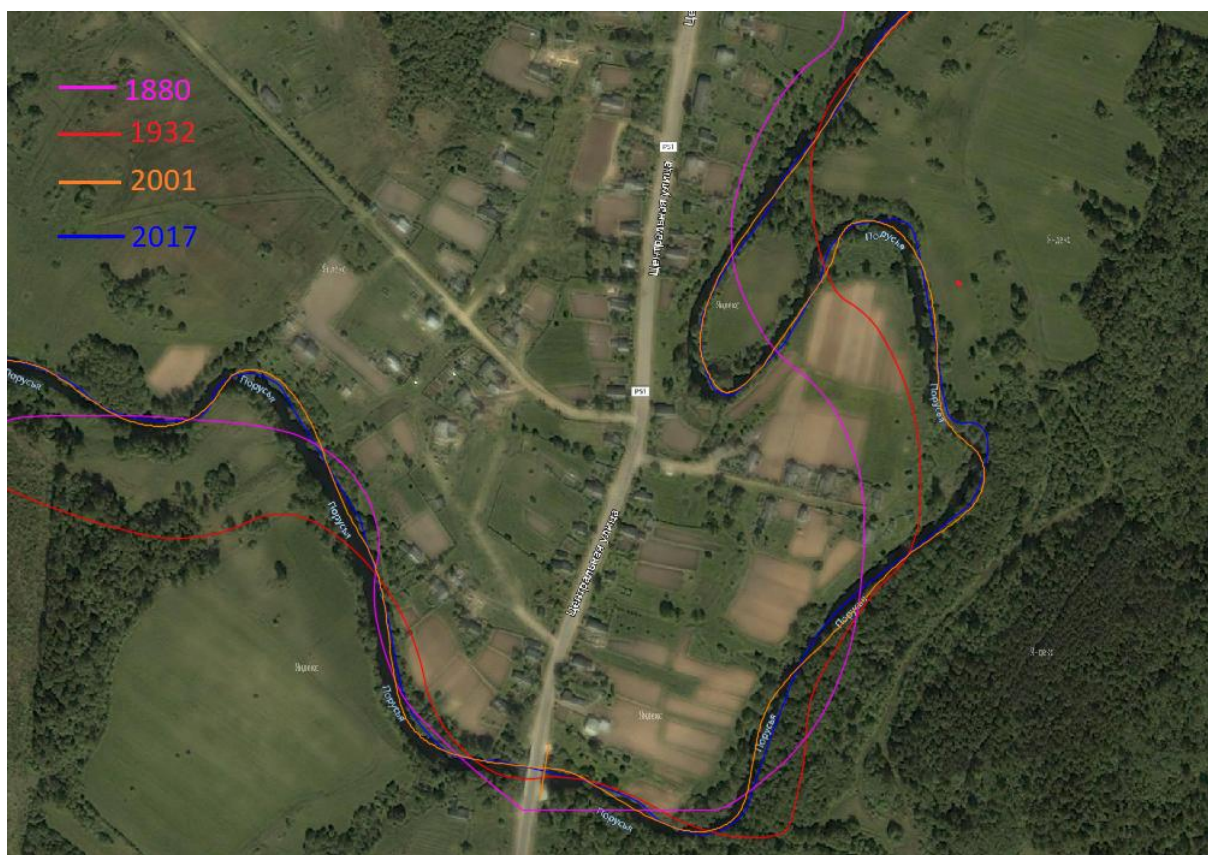


Рис. 8 – русла реки Порусья с 1880 по 2017 год

В качестве характерных точек были выбраны мост через р. Порусья и перекресток в деревне Минцево. Первое, что бросается в глаза, это левая часть картинки. В 1880 году река Порусья текла практически в месте современного русла, а к 1932 году сместилась вправо на 100-120 м. Таким образом, скорость размыва берега составила приблизительно 2 метра в год. Однако в следующие 85 лет река практически вернулась в положение 1880 года. Скорость размыва составила уже 1,17 м/год. В 2017 году на правом и левом берегах реки Порусья были заложены плановые марки (Рис 6). Размыв берега в районе Марки №1 составил 0.7 м, в районе Марки №2 – 1,3 м.



Рисунок 9 – Расположение плановых марок на берегах р. Порусья

В правой части картинки мы видим смещение русла вправо, причем достаточно равномерное. С 1880 года русло сдвинулось на 50-60 м, скорость размыва составила 1 м/год. С 1932 русло еще сдвинулось на 45-55 м, скорость размыва составляет 0,58 м/год. Также в правой части картинки мы видим образовавшуюся недавно излучину. Примечательно, что подобное образование излучины противоречит классической теории руслового процесса, где с развитием излучины русло реки спрямляется. На спутниковом снимке хорошо видно старицу 1932 года. Данная излучина отсутствует на топографической карте 1985 года, но появляется на топографической карте Новгородской области 1990 года. Вероятнее всего, излучина образовалась в конце 1980-х. Река промыла себе новое русло, после того как в старое упали несколько крупных деревьев. При этом уменьшилась площадь живого сечения, уровень воды поднялся и река начала разрабатывать новое русло. Смещение русла составило 175 м. Также в данном примере изменяется русловой процесс, длина

реки (пусть и незначительно), уклон водной поверхности на рассматриваемом участке.

Таким образом, на данном участке выявлены два вида плановых деформаций: интегральный (равномерный, по несколько дм/год) и дискретный, где за один-два года образовалась новая излучина в 200 м от старого русла. Существующие методики никак не затрагивают второй вид плановых деформаций и не позволяют сделать никаких расчетов.

Участок №2 находится в 5 км западнее г. Поддорье. Данное место интересно наличием старицы в 800 м от современного русла. Деревня. Михайлово находится на правом берегу реки Порусья,

Так как участки №1 и №2 находятся близко (8 км), на втором участке использованы те же картографические материалы:

1. Топографическая карта О-36-87-В 1932 г. масштаб 1:50000

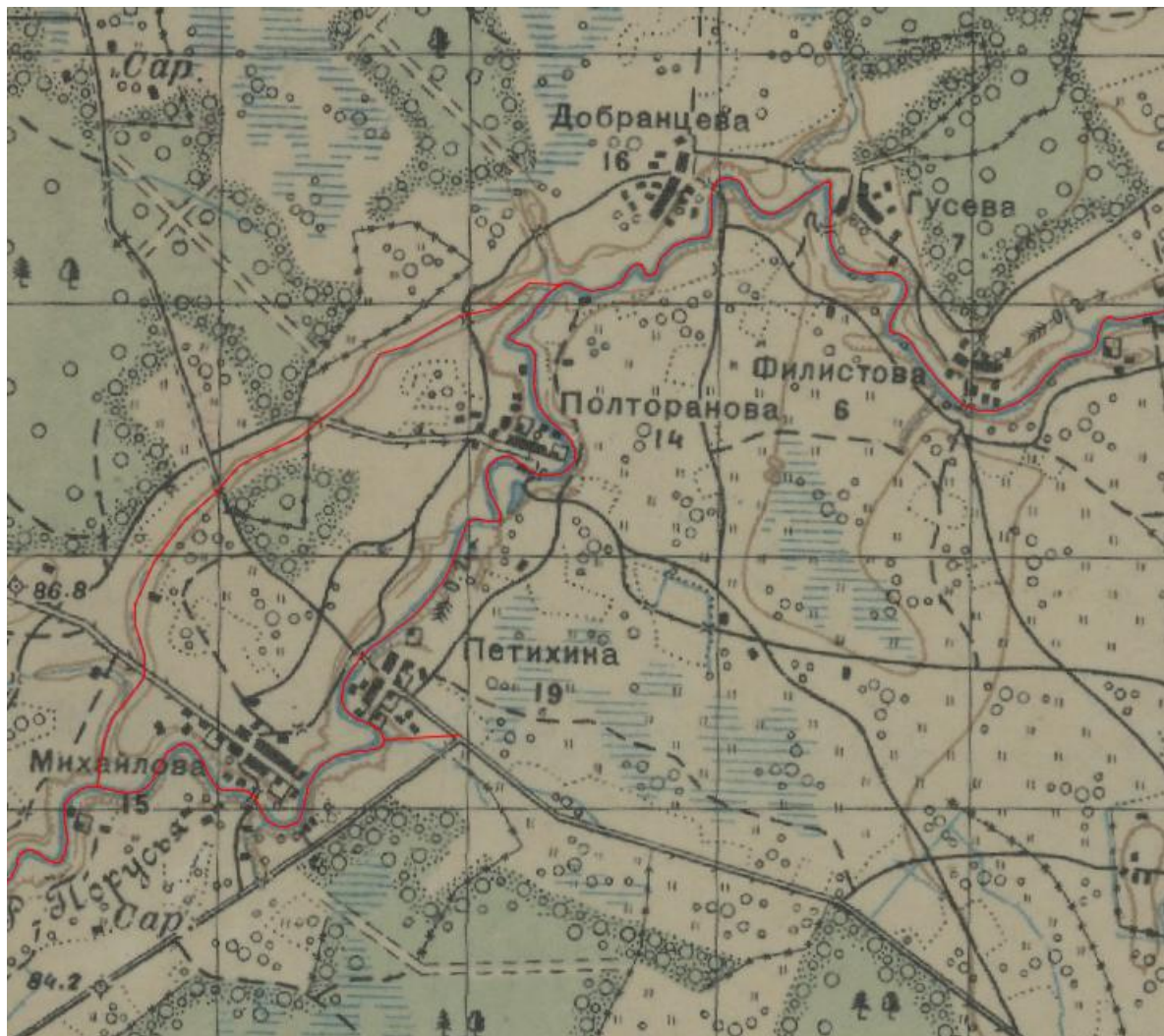


Рисунок 10 – Топографическая карта О-36-87-В 1932 г

2. Карта губернии Псковской и Новгородской 1880 г Шуберт



Рисунок 11 – Карта губернии Псковской и Новгородской 1880 г

3. Спутниковый снимок ArcGISImagery



Рисунок 12 – Спутниковый снимок ArcGISImagery

Для определения плановых деформаций на участке №2 также наложены русла рек разных карт, привязаны они к характерным точкам на местности. На рис. 13 наложены русла рек 1880, 1932, 2001 и 2017 годов.

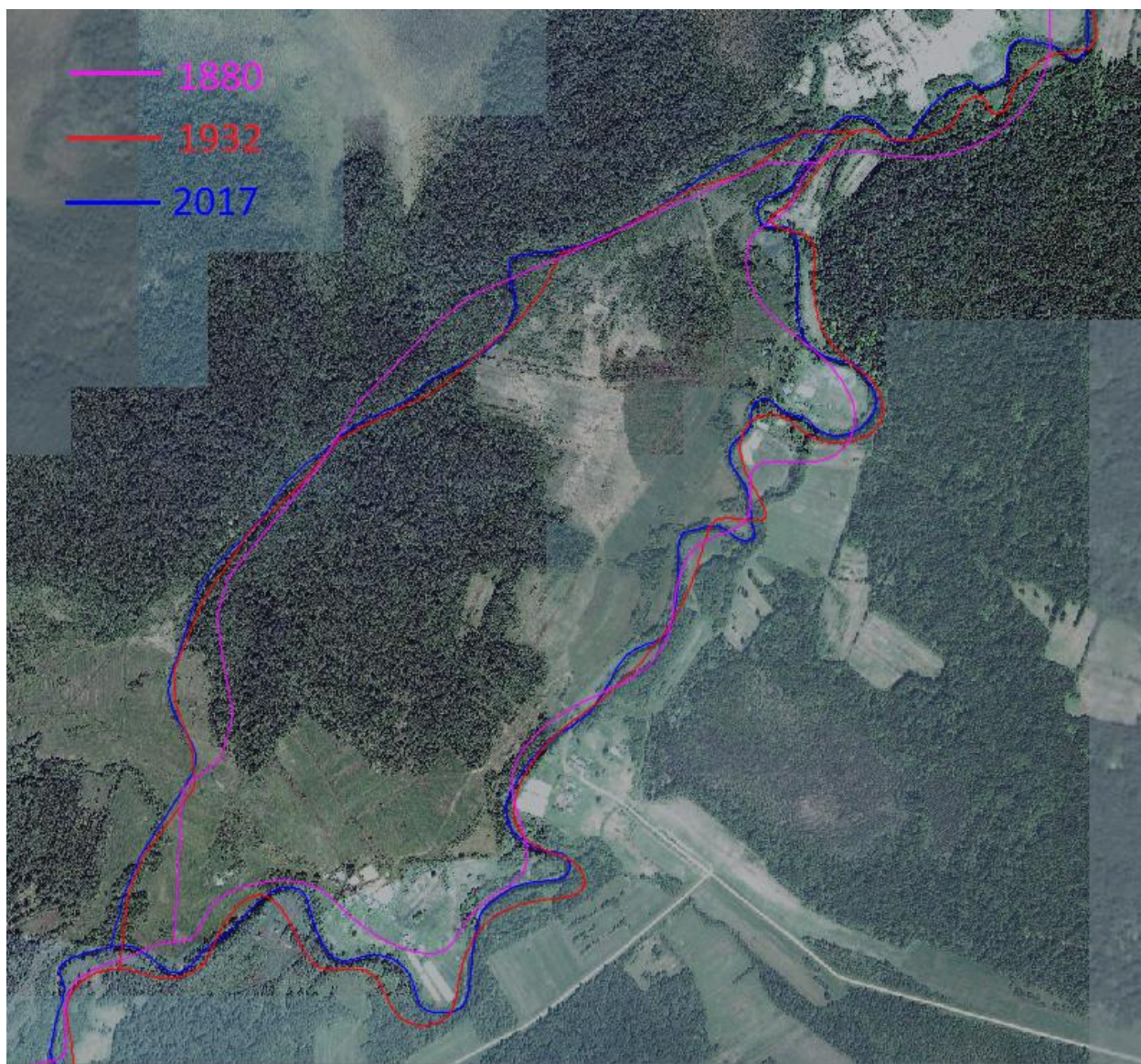


Рисунок 13 – русла реки Порусья в районе д. Михайлово за 1880, 1932 и 2017г.

В качестве характерных точек был выбран перекресток, который хорошо прорисован на картах и отлично виден на спутниковом снимке. Данный участок интересен наличием старицы, которая также отлично видна на топографических картах и спутниковом снимке. На карте 1788 года на левом берегу старицы изображена деревня Чертово. На картах начала XIX века этой деревни уже нет. Вероятно, это связано с тем, что река изменила положение русла и переместилась на 800-900 м правее. Отсутствие водного объекта рядом с деревней вынудило людей переселиться в близлежащие деревни. Из этих соображений можно предположить, что русло реки изменилось во второй половине XVIII века.

Также как и на первом участке русло сместилось в сторону, только уже на большее расстояние. Такие изменения положения русла при проектировании мостовых переходов и остальных гидротехнических сооружений предсказать или рассчитать практически невозможно. В [2] прописано только определение плановых деформаций, вызванных постепенным размывом берегов.

Посмотрим на основное русло на участке №2. По нему также не сделать никаких однозначных расчетов. Потому что сначала река смещается на некоторое количество метров вправо, а в следующие 85 лет она смещается на несколько метров влево. Зависимость между прогнозом и рассчитанным размывом прямая, то есть если за 10 лет размыв составил 2 м (0,2 м/год), значит за расчетный период эксплуатации, допустим, мостового перехода, размыв составит 8 м. Подобные результаты расчета легко объяснить: в 18 веке для измерения расстояний использовался землемерный сажень, и землемер измерял им расстояния от деревни до деревни. Шел он там, где были дороги. Поэтому наиболее точно нарисованы те участки реки, куда можно было беспрепятственно подойти (рядом с дорогой и рядом с деревнями). При прохождении реки через болотистую и лесистую местность река на старые карты наносилась схематично. Действительное местоположение на картах было уточнено только при появлении аэрофотосъемок. Таким образом, верить можно только тем участкам, которые расположены рядом с мостами или деревнями.

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать вывод, что методика, описанная в пункте 6.2 [2], является недостаточно эффективной при отсутствии точного картографического материала.

2.2 Глубинные деформации на р. Порусья

Используя картографические материалы 1932 и 1984 года построен продольный профиль реки Порусья от истока до устья. (рис 14), а также рассчитана кривая эрозионного вреза по формуле Н. И. Маккавеева:

$$J=K_0*Q^{2/3}$$

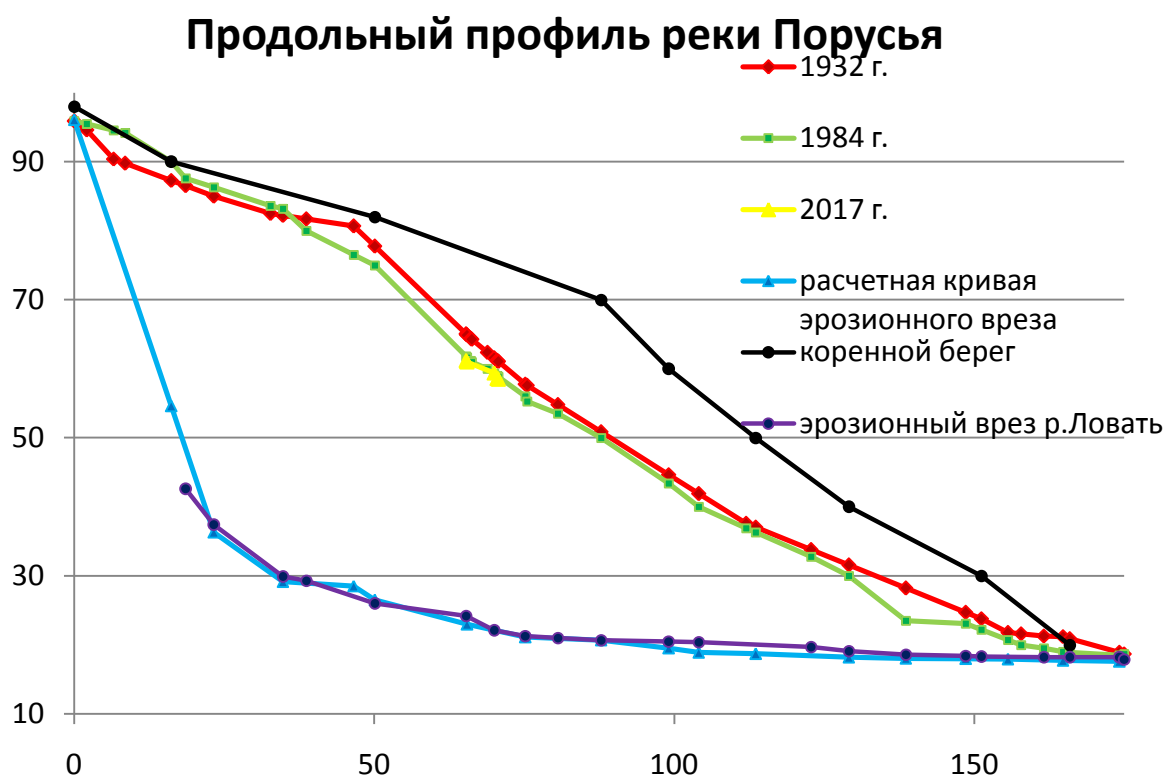


Рис. 14 – Продольный профиль реки Порусья

На продольном профиле четко виден размыв дна начиная с 35-го километра реки. Далее практически на всем протяжении реки размыв колеблется от 1 до 3 метров, а на 138 км размыв дна максимален – 5 метров за 52 года (0,1 м/год). В районе деревни Минцево скорость размыва, рассчитанная на основе картографического материала составляет 3 м за 70 лет или 0,043

м/год. Профиль наглядно показывает общий тренд размыва дна, причем максимальный размыв зафиксирован недалеко от устья. Связано это с базисом эрозии. У любой реки базисом эрозии является водоем, в который она впадает. В нашем случае Порусья впадает не в водоем, а в реку Полисть, а ее базис эрозии – озеро Ильмень. С течением времени в нижней части реки размыв прекращается. Рассматриваемая река Порусья достаточно молодая, поэтому русло ее далеко от базиса эрозии. Голубой линией показан расчетный базис эрозии для р. Порусья. Для наглядности фиолетовым цветом построен продольный профиль реки Ловать, русло которой практически полностью выработано, и больше в нижнем течении размываться не может из-за маленьких уклонов и, следовательно, скоростей течения. Примечательно, что современное русло реки Ловать и расчетная кривая эрозионного вреза реки Порусья практически совпадают.

Скорость размыва, рассчитанная на основе картографического материала, составляет 4 м за 70 лет или 0,06 м/год. Проверка полученной величины проведена путем бурения скважин до водоупора с помощью ручного Бура «Мечта геолога» на левом берегу реки Порусья 15 мая 2018 года (рис 15).



Рис. 15 – Отметки водоупора в д. Минцево.

На рисунке 12 изображены русла, снятые с карты 1880 (розовый), 1932 (красный), 2001 (оранжевый) и 2017 (синий) годов. Зная положение русла в разные промежутки времени, можно рассчитать скорость глубинного размыва. На розовой линии отметка водоупора составляет 64,2 м абс, мощность аллювиальных отложений – 3м. В 1932 году русло сместилось на 80 м правее, а отметка водоупора составила 59,0 м абс. Таким образом, скорость глубинного размыва реки Порусья в деревне Минцево составила 5,2 м за 52 года, или 0,1 м/год. Однако за последующие 85 лет размыв составил около 1 м. Возможно, это связано с образовавшейся излучиной, которая по сути только недавно начала размываться.

Вывод

Сейчас максимальный размыв в среднем течении. Базис эрозии поднимается выше по течению. В нижнем течении скорости невелики, и размыв либо минимален, либо вовсе происходит заиление и занесение. В верхнем течении так же сильного размыва нет, ввиду невысокой размывающей способности. Так, в среднем течении реки Порусья глубина долины достигает 20 м, а в верховьях или в низовьях – 5-10. Следовательно, в среднем течении размыв более интенсивный.

2.3 Расчет глубины и ширины размыва грунта.

Рассмотрим размываемый участок мощностью h . На него действуют сдвигающие напряжения:

- от толщи водной массы:

$$\rho_w g H \cdot \sin \alpha ;$$

- касательное движущегося турбулентного потока:

$$\frac{g}{C^2} \rho_w V^2 ,$$

где C – коэффициент Шези:

$$C = \frac{1}{n} R^{1.3\sqrt{n}}$$

где n – коэффициент шероховатости (для задернованной перемычки принимается равным 0,025 [табл. 3.14 проектирование малых мостов], для

размытого тела перемычки – 0,03), v – средняя скорость потока, H – размывающий слой воды.

Напряжения, препятствующие сдвигу:

$$\tau_{y\partial} = (\rho_z - \rho_{\partial})(1 - \varepsilon)gh \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi + c,$$

где φ – угол внутреннего трения, c – сцепление грунта, ε – пористость, α – уклон.

Скорость размывающего потока:

$$V = C\sqrt{RI},$$

где C – коэффициент Шези, R – гидравлический радиус потока, I – уклон.

Сдвиг (смыв) рассматриваемого участка произойдет в тот момент, когда сдвигающие напряжения превысят удерживающие.

$$\rho_{\partial} g H \cdot \sin \alpha + \frac{g}{C^2} \rho_{\partial} V^2 \geq (\rho_z - \rho_{\partial})(1 - \varepsilon)gh \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi + c$$

Для аллювиальных отложений скорость размыва будет пропорциональна отношению расчетной скорости потока к неразмывающей скорости для данного грунта и сдвигающего напряжения к удерживающему (чем это отношение больше, тем больше размыв):

$$\frac{dh}{dt} = k \frac{v}{v_{np}} \cdot \frac{\tau_{сдв}}{\tau_{y\partial}}$$

где v и v_{np} – соответственно скорость потока и неразмывающая скорость для данного грунта, $\tau_{y\partial}$ и $\tau_{c\partial\partial}$ – удерживающее и сдвигающее напряжения, k – коэффициент пропорциональности.

Неразмывающая скорость зависит от глубины потока и аппроксимируется следующим выражением:

$$v_{np} = \alpha H^{\beta},$$

где α и β эмпирические коэффициенты. Для мелкозернистых песков $\alpha = 0,5$, $\beta = 0,2$, для среднезернистых – $\alpha = 0,7$, $\beta = 0,15$.

Поскольку в правой части выражения мы имеем кратное значение превышения размывающей способности над удерживающей, и при равенстве последних величина размыва будет иметь порядок значений 10^{-4} , то и коэффициент пропорциональности k имеет такой же порядок.

При размыве аллювиальных отложений $\frac{\tau_{c\partial\partial}}{\tau_{y\partial}} \geq 1$.

$$\frac{dh}{dt} = k \frac{v}{\alpha H^{\beta}} \cdot \frac{\tau_{c\partial\partial}}{(\rho_z - \rho_e)(1 - \varepsilon)gh \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi + c},$$

где v – скорость потока (м/с); ρ_z и ρ_e – соответственно плотность частиц грунта и воды (кг/м^3), h – размываемый слой (м), H – глубина потока (м), t – расчетный шаг.

После интегрирования получаем зависимость для глубины размыва в течение времени t :

$$h = \frac{\sqrt{k \frac{v}{\alpha H^\beta} \tau_{c\partial\phi} (\rho_z - \rho_e) (1 - \varepsilon) g \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi \cdot t + C - c}}{(\rho_z - \rho_e) (1 - \varepsilon) g h \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi}$$

где C – постоянная интегрирования.

Ширина размываемого участка B (рис. 16) определяется углом естественного откоса (внутреннего трения) грунта φ (при соответствующей влажности) и глубиной размыва h :

$$\frac{B}{2} = h \cdot \operatorname{tg}(90 - \varphi)$$

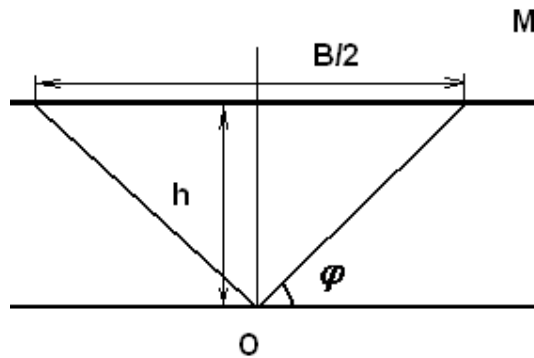


Рисунок 16. Геометрические параметры эрозионного размыва.

Длина размываемого участка L (рис. 17) – из системы уравнений:

$$L/2 = h \cdot \operatorname{tg} \beta$$

$$\frac{A}{\sin \alpha} = \frac{L/2}{\sin(90 - \alpha)}$$

$$\frac{A + h}{\sin(\alpha + 90 - \beta)} = \frac{CD}{\sin(90 - \alpha)}$$

$$CD^2 = (L/2)^2 + h^2,$$

$$L/2 = \sqrt{\frac{h^2 \operatorname{tg}(90 - \alpha) \sin(90 - \alpha)}{\sin \alpha}}$$

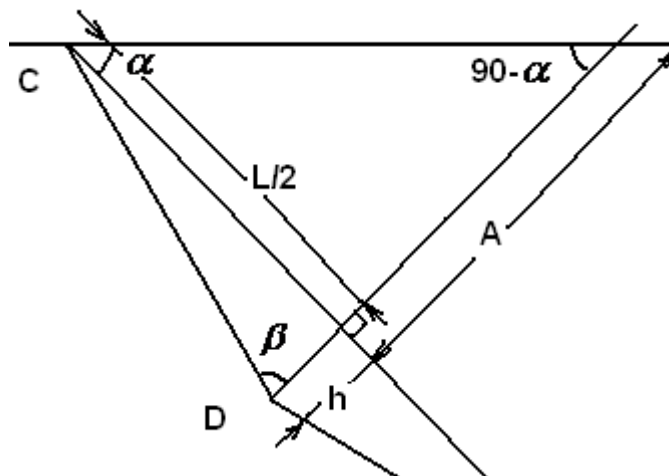


Рисунок 17. Геометрические параметры эрозионного размыва.

Экспериментальное апробирование данной методики расчета проводилось весной 2018 года. Размыву подвергался участок в пойме р. Порусья рядом с деревней Минцево. Грунты аллювиальные, песок мелкозернистый, измеренный угол внутреннего трения 35° , удельное сцепление 0,5 кПа. Параметры экспериментов представлены в таблице 4.

№ эксперимента	1	2	3
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	0,002	0,002	0,002
$H, \text{ м}$	0,015	0,015	0,015
$\tau_{сдв}$	178	170	160
$\tau_{y\partial}$	36,6	39,0	41,8
$V_{ср}, \text{ м/с}$	1,39	1,33	1,24
уклон, доли единицы	0,77	0,71	0,61

Таблица 4. Параметры аллювиальных склонов

Результаты расчетов и соответствующих им измерений сведены в таблицу 5.

t, сек	B, м		h, м		
	расчетная	средняя измеренная	расчетная	средняя измеренная	максимальная
10	0,1	0,14	0,01	0,02	0,02
100	0,1	0,16	0,07	0,11	0,17
200	0,14	0,2	0,13	0,14	0,26
300	0,2	0,22	0,19	0,16	0,39
400	0,26	0,26	0,24	0,17	0,57
500	0,32	0,32	0,3	0,21	0,65
600	0,38	0,35	0,36	0,26	0,71

Таблица 5. Ширина и глубина промоины в 1 эксперименте

t, сек	B, м		h, м		
	расчетная	средняя измеренная	расчетная	средняя измеренная	максимальная
10	0,1	0,12	0,01	0,02	0,02
100	0,1	0,15	0,07	0,08	0,15
200	0,12	0,16	0,12	0,24	0,3
300	0,18	0,24	0,17	0,26	0,35
400	0,23	0,26	0,22	0,34	0,45
500	0,3	0,42	0,27	0,35	0,45
600	0,36	0,42	0,35	0,36	0,45

Таблица 5.1. Ширина и глубина промоины в 2 эксперименте.

t, сек	B, м		h, м		
	расчетная	средняя измеренная	расчетная	средняя измеренная	максимальная
10	0,1	0,15	0,01	0,02	0,02
100	0,11	0,21	0,05	0,06	0,12
200	0,12	0,25	0,09	0,1	0,15
300	0,15	0,26	0,14	0,12	0,18
400	0,19	0,28	0,18	0,2	0,3
500	0,23	0,3	0,22	0,25	0,45
600	0,3	0,3	0,28	0,4	0,45

Таблица 5.2. Ширина и глубина промоины в 3 эксперименте.

2.4 Оценка результатов моделирования

Для проверки работоспособности любой разработанной модели, используются данные наблюдений за моделируемым объектом. В нашем случае наблюдения за размывом берегов никто не производит, поэтому сравнивать рассчитанные значения мы будем со значениями измеренными.

1. Сравнение среднего наблюденного и расчётного значений. Для любой выборки среднее является показателем, дающим о ней основное представление. Сравнение средних величин расчётной и эмпирической выборок представляет первичную информацию об адекватности предложенной модели.

В нашем конкретном случае $B_{\text{расч}}=0,195$ м, а $B_{\text{изм}}=0,246$ м, $h_{\text{расч}}=0,166$ м, а $h_{\text{изм}}=0,184$ м.

2. Относительная погрешность, характеризующая величину ошибок расчёта в сравнении с действительными значениями ряда, в представленном примере (Δ_{RE}) равна -0,23 для ширины размыва, и -0,13 для глубины.

Величины ошибки и измеряемого параметра практически совпадают.

$$\Delta_{RE} = \frac{1}{n} \sum_1^n \frac{|X_{расч} - X_{изм}|}{X_{изм}}$$

3. Средняя процентная ошибка (mean percentage error), определяет среднее смещение расчётных значений относительно измеренных и равна 23% и 13%. Модель является несмещённой, если критерий не превышает 5 % [93].

$$\Delta_{MPE} = \frac{1}{n} \sum_1^n \frac{(X_{расч} - \overline{X_{изм}})}{X_{изм}}$$

4. Среднее отклонение или среднеквадратическая ошибка MSE (mean square error) составила 0.00436 для ширины размыва, и 0.00408 для глубины.

$$\Delta_{MSE} = \frac{\sum_1^n (X_{расч} - X_{изм})^2}{n}$$

Каждое значение ошибки расчёта в этом критерии возводится в квадрат, что подчеркивает влияние больших ошибок. Считается, что это важно, так как позволяет подобрать модель, постоянно дающую средние по величине ошибки, в отличие от той, которая периодически даёт большие.

5. Квадратичное отклонение RMSE составило 0,066 для ширины, и 0,064 для глубины.

$$\Delta_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (X_{расч} - X_{изм})^2}{n}}$$

6. Следующий критерий характеризует разницу между измеренными величинами и рассчитанными. Именно на такую величину $\Delta = 0,014$ м отличаются, в среднем, значения измеренного ряда от расчётного и для ширины размыва, и для глубины.

$$\Delta = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_1^n (X_{расч} - X_{изм})^2}$$

7. Пожалуй, самый распространенный из критериев - критерий Нэша–Сатклиффа. Он изменяется от 0 до 100 %. Чем он больше, тем выше достоверность разработанной модели.

$$\Delta_{NS} = 1 - \frac{\sum_1^n (X_{расч} - X_{изм})^2}{\sum_1^n (X_{изм} - \overline{X_{изм}})^2} \times 100 \%$$

Для ширины $\Delta_{NS} = 66\%$, для глубины – 69%.

8. Систематическая ошибка расчёта стока *Bias*:

$$\Delta_{Bias} = \frac{\sum_1^n (X_{расч} - X_{изм})}{\sum_1^n X_{изм}} \times 100 \%$$

Считается, что *Bias* не должен по абсолютной величине превышать 5%. В нашем случае для ширины размыва $\Delta_{Bias} = 21\%$, для глубины $\Delta_{Bias} = 11\%$.

9. Ещё один критерий достоверности – коэффициент корреляции, который указывает на тесноту и направление связи между измеренными и рассчитанными величинами. Он является безразмерной величиной и обозначается R. Рассчитывается по формуле

$$R = \frac{\sum_1^n (X_{расч} - \overline{X_{расч}})(X_{изм} - \overline{X_{изм}})}{\sqrt{\sum_1^n (X_{расч} - \overline{X_{расч}})^2 \sum_1^n (X_{изм} - \overline{X_{изм}})^2}}$$

Изменяется коэффициент корреляции от -1 до $+1$. Чем ближе он к $+1$ или к -1 , тем теснее прямая или обратная линейная корреляционная связь. Считается, что при $R < 0.3$ – корреляционная зависимость слабая, $0.3 - 0.7$ – средняя; > 0.7 – сильная. Для ширины $R=0,9$, для глубины $R=0,85$.

Однако, коэффициент корреляции показывает лишь линейную зависимость между измеренными и рассчитанными величинами.

10. Квадрат коэффициента корреляции (коэффициент детерминации) $R^2=0,81$ (81%) для ширины и $0,72$ (72%) для глубины размыва. Чем ближе значение КД к единице, тем лучше модель описывает реальные данные. Модель считается адекватной, если $КД > 0.75$.

Итак, по большинству рассмотренных критериев предложенный способ расчета показывает неудовлетворительные результаты для ширины размыва. А вот для глубины результаты получились хорошими. Таким образом, по данной модели приемлемо считать скорость размыва грунтов.

Ошибка на карте 1932 года в Пирогово.

Использование топографических карт для расчета русловых деформаций иногда может приводить к большим ошибкам. Бывают случаи, когда ошибки имеются и на достаточно точных крупномасштабных картах масштаба 1:50000. Пример такой неточности представлен на рисунках 15 и 16.



Рисунок 18. – Топографическая карта 1932 года (масштаб 1:50000)

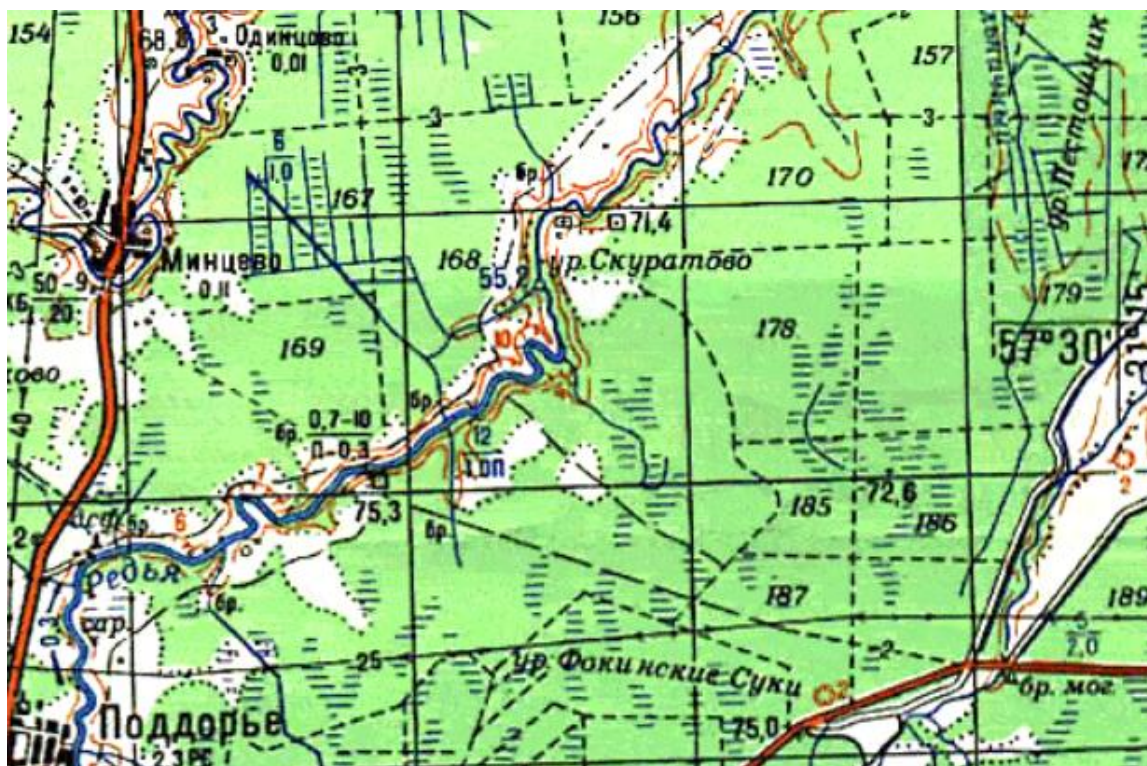


Рисунок 19 – Топографическая карта 1988 года (масштаб 1:100000)

На топографической карте 1932 года в районе деревни Пирогово показана отметка уреза воды – 68.0 м над уровнем моря. На карте 1988 года в том же месте отметка на порядок ниже – 55.2 м. Таким образом размыв составляет 12.8 метра за 56 лет, или 0.23 м/год.

Река Редья протекает в нескольких километрах справа от Порусьи. Эти реки очень похожи, поэтому логично предположить, что размыв у них будет похожим. На Порусье размыв в районе деревни Марково составил 3,4 м за 56 лет, или 0,06 м/год. Получается, что на р. Редья русло размывается в 4 раза быстрее. Чтобы узнать, действительно ли русло врезалось на 13 метров за такой небольшой промежуток времени, были проведены инструментальные измерения в районе урочища Пирогово. Оказавшись на месте мы увидели долину с врезанным руслом, превышение бровки долины над уровнем воды составило 12-15 м. Ширина долины – около 180 м. Морфометрический створ приведен на рис. 20

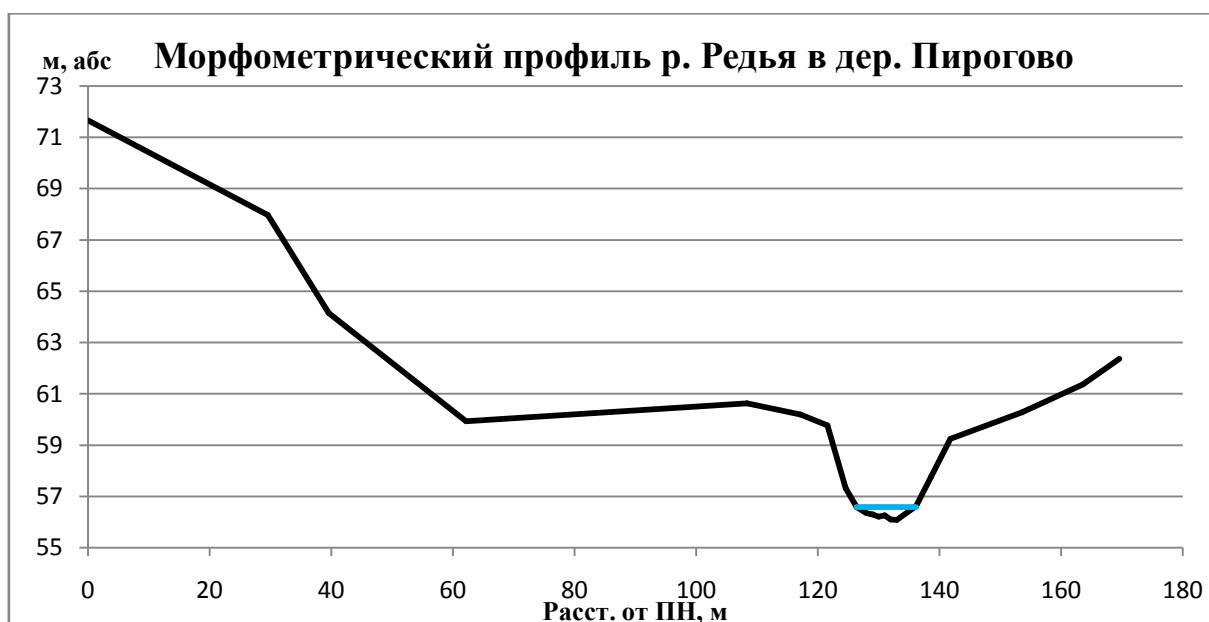


Рисунок 20 – Морфометрический профиль реки Редья в створе дер. Пирогово. Уровень воды на 30 мая 2018 составил 56,58 м абс

Может ли река размыть 13 метров суглинка за 56 лет? В результате инструментальных измерений, сделанных в мае 2018 года, с помощью комплекта ГНСС была измерена отметка уровня воды и отметка дна. На 30 мая 2018 года уровень воды в створе составил 56,58 м абс, отметка дна около 56,0 м абс. Таким образом, снятая с топографической карты 1988 года отметка дна на 0,8 м ниже, чем полученная в результате произведенных измерений. Это может быть связано с занесением рассматриваемого участка наносами: в месте, где были измерены глубины наблюдался подпор, вызванный карчевым затором (рис. 21), либо с неточностью нанесения измеренной отметки дна на топографическую карту.



Рис. 21 – Подпор на р. Редья в районе створа. Дата съемки: 18 мая 2018.



Рис. 22. Река Редья в районе морфометрического створа. Дата съемки: 18 мая 2018.

Так как за последние 30 лет вертикальный размыв русла реки Редья практически отсутствовал, 13 метров, которые размыла река с 1932 по 1988 год кажутся нереальными. Если на морфометрический профиль нанести уровень,

указанный на карте 1932 года, мы увидим, что долина у такого русла практически отсутствует. Таким образом, кроме врезания русла на 13 метров, еще необходимо было размыть долину, шириной 150 м, на 7-8 метров в глубину. Это огромное количество суглинков, размыв которых происходит в сотни раз медленнее. Исходя из всего вышесказанного, можно сделать вывод: на карте 1932 года отметка дна не соответствует действительности.

Вывод

Механизм размыва берегов на малых, средних и крупных реках существенно различается. При возникновении местного ледового или карчевого затора на малой реке в верхнем бьефе поднимается уровень воды, вода выходит на пойму, основной поток обходит препятствие по местным понижениям и в силу легкой размываемости грунта нередко образует новое русло. При подобном процессе река может смещаться на сотни метров в сторону за один паводок. На обоих рассматриваемых участках русла реки Порусья сместились в сторону. В первом случае на 200 м, во втором на 800 м. . Все это никак не учитывается при строительстве гидротехнических сооружений и мостовых переходов. Именно использование старых картографических материалов позволяет определить изменение руслового процесса, как это произошло на реке Порусья в д. Минцево, где в результате местного затора образовалось новое русло с излучиной.

Расчет ширины и глубины размыва аллювиальных грунтов по большинству критериев не является эффективным, однако, для расчета глубины размыва погрешность гораздо меньше, чем для ширины. То есть глубинные деформации можно рассчитать, зная морфометрические характеристики водотока и физико-механические свойства грунтов.

Список использованной литературы

1. Чалов Р. С. «Почему размываются берега рек», 2000
2. ВСН 163-83 «Учет деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов (нефтегазопроводов)» 1985 г.
3. Интернет-источник: <http://shkolnie.ru/geografiya/1622/index.html?page=3>
4. Интернет-источник: <http://vsereki.ru/atlanticheskij-ocean/bassejn-baltijskogo-morya/bassejn-oz-ilmen/lovat/polist/porusya>
5. СП 11-103-97 «Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства» 1997 г.
6. ГОСТ 21667-76 «Картография. Термины и определения» 1977 г.
7. ГОСТ 19179-73. «Гидрология суши. Термины и определения»
8. Справочное пособие для обработки материалов инженерно-геологических изысканий. - М: ДАР\ВОДГЕО, 2005.