

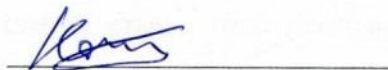
СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель проекта,
д.т.н.



А.Т. Зиновьев (введение,
заключение, разделы 1, 2, 3)

Исполнители проекта:
с.н.с., к.ф-м.н.



К.Б. Кошелев (раздел 3)

н.с.



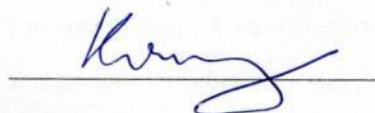
К.В. Марусин (введение,
заклучение, разделы 1, 2, 3)

вед. инж.



А.А. Вагнер (раздел 1, 2)

Нормоконтролёр,
с.н.с., к.с-х.н.



Е.Д. Кошелева

РЕФЕРАТ

Отчет 63 с., 1 кн., 35 рис., 5 табл., 22 источн.

РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ОПАСНЫЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, НАТУРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ, РЕКА ОБЬ, ГОРОД БАРНАУЛ

Представлены результаты третьего года исследований, выполненных в рамках проекта РФФИ 19-41-220001 «Прогнозирование опасных гидрологических ситуаций на участках речных водозаборов на основе математического моделирования и натуральных исследований русловых процессов (на примере реки Обь у г. Барнаула)».

Объект исследования – участок р. Обь на территории г. Барнаула в районе расположения городских речных водозаборов.

Цель проекта – создание компьютерной модели руслового процесса, адекватно описывающей гидро- и морфодинамику русла р. Обь на рассматриваемом участке в нестационарных гидрологических условиях на масштабах времени от нескольких суток до нескольких лет (активных фаз гидрологического цикла).

На основе анализа ретроспективных материалов космической съемки и данных натуральных наблюдений сделана оценка текущей гидроморфологической ситуации на участке р. Обь у Барнаульского городского речного водозабора №2 и перспектив её дальнейшего развития.

Представлены результаты натуральных исследований характеристик крупности русловых наносов р. Обь на территории города Барнаула.

Построена компьютерная модель морфодинамики участка русла реки в районе водозабора №2. Выполнено моделирование течения, транспорта наносов, вертикальных и плановых русловых деформаций в нестационарных условиях спада половодья и перехода к межени. Полученные результаты расчета русловых деформаций в целом согласуются с основными чертами и тенденциями развития руслового процесса на рассматриваемом участке, выявленными при анализе и оценке гидроморфологической ситуации.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 Морфодинамика русла р. Обь в районе Барнаульского водозабора №2.....	7
2 Крупность русловых наносов р. Обь на территории г. Барнаул.....	20
3 Компьютерное моделирование морфодинамики русла р. Обь в районе Барнаульского водозабора №2.....	38
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	60
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	62

ВВЕДЕНИЕ

В настоящем отчете представлены результаты третьего года исследований, выполненных в рамках проекта РФФИ 19-41-220001 «Прогнозирование опасных гидрологических ситуаций на участках речных водозаборов на основе математического моделирования и натурных исследований русловых процессов (на примере реки Обь у г. Барнаула)».

Цель проекта состоит в том, чтобы создать компьютерную модель, адекватно отражающую гидро- и морфодинамику русла р. Обь в нестационарных гидрологических условиях на масштабах времени от нескольких суток до нескольких лет (активных фаз гидрологического цикла).

Объект исследования – участок реки Обь на территории города Барнаула протяженностью 20,4 км. Данный участок характеризуется как сложной морфологией русла, так и наличием в русле реки и вблизи него значительного числа критически важных объектов хозяйственной инфраструктуры, в том числе городских водозаборов.

На первом этапе была разработана трехмерная нестационарная математическая модель руслового потока, описывающая течение, транспорт наносов и русловые деформации. Выполненное компьютерное моделирование руслового процесса на объекте исследований дало хорошее качественное соответствие результатов расчета с данными натурных наблюдений [1].

На втором этапе работ основное внимание было уделено участку русла в районе городского водозабора №1, который на протяжении многих лет испытывает существенные трудности в работе, обусловленные русловым процессом. В течение длительного времени (май - октябрь) и при различных гидрологических условиях был выполнен комплекс натурных наблюдений за параметрами руслового потока и морфодинамикой русла. Полученный набор взаимосогласованных натурных данных дал надежную и актуальную информацию для построения компьютерной модели руслового процесса на рассматриваемом участке и позволил провести всестороннюю верификацию результатов моделирования, которое воспроизводило реальную ситуацию наблюдаемого периода. По итогам этой верификации построенная на первом этапе работ математическая модель была усовершенствована [2].

Объектом исследования данного этапа работ по проекту является участок реки Обь в районе речного водозабора №2, который является основным источником питьевого водоснабжения города Барнаула.

В настоящее время русловой процесс не оказывает существенного влияния на его работоспособность. Однако общая тенденция в эволюции русла реки на данном участке уже в недалекой перспективе может привести к прекращению его функционирования, или, по крайней мере, серьезно осложнить его работу.

Соответственно, основной задачей данного этапа является построение компьютерной модели морфодинамики русла р. Обь в районе Барнаульского водозабора №2, которая бы адекватно описывала вертикальные и плановые деформации русла на данном участке. Такая модель позволяет проводить численное изучение и оценку различных вариантов инженерных мероприятий, направленных на противодействие негативному развитию руслового процесса.

Для корректного построения компьютерной модели и верификации результатов расчетов необходимо сделать оценку текущей гидроморфологической ситуации на участке р. Обь у Барнаульского городского речного водозабора №2 и перспектив её дальнейшего развития. Этому вопросу посвящен раздел 1 отчета.

Как показал опыт предыдущих этапов исследований, ключевым элементом компьютерной модели является формула (или формулы) для определения расхода русловых наносов, а необходимыми параметрами в любой из таких формул являются характеристики крупности транспортируемого речным потоком материала. Имеющиеся натурные данные из-за малого количества проб и их пространственной ограниченности нельзя признать достаточными для построения адекватной морфодинамической модели. В разделе 2 изложены результаты работ по исследованию крупности русловых наносов р. Обь как на участке русла в районе водозабора №2, так и в целом на территории г. Барнаула. Рассмотрен также вопрос о влиянии вариаций характеристик крупности наносов на результаты расчета их расхода.

Раздел 3 посвящен построению компьютерной модели морфодинамики русла р. Обь на участке водозабора №2. Представлены результаты моделирования и сделана их оценка на основе имеющихся натурных данных.

Необходимо особо отметить, что в отчете применяется условная система высот (усл.), нуль которой совпадает с нулем гидрологического поста Барнаул. Все приводимые далее вертикальные отметки уровня воды, рельефа русла и т.п., если не оговорено иное, даны в метрах в этой условной системе (м усл.).

1. Морфодинамика русла р. Обь в районе Барнаульского водозабора №2

Объектом исследования настоящего этапа работ по Проекту является участок реки Обь в районе городского речного водозабора №2, расположенного на южной окраине г. Барнаула. По морфодинамической классификации Р.С. Чалова [3], русло реки на данном участке образует систему двух сопряженных излучин: верхней – свободной и нижней – вынужденной (рисунок 1.1).

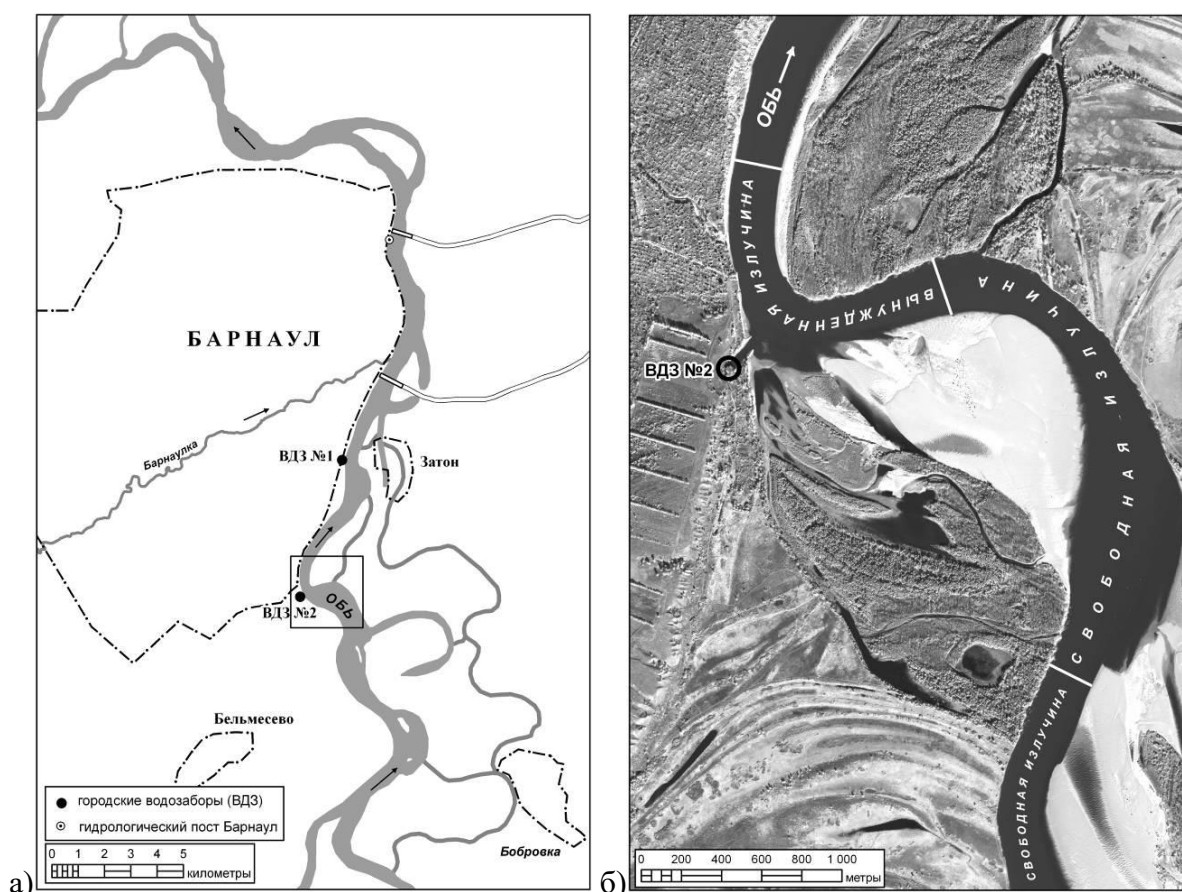


Рисунок 1.1 – Местоположение и морфологическое строение исследуемого участка русла р. Обь в районе Барнаульского водозабора №2: а) местоположение участка; б) морфология русла. Подложка - снимок спутника Ресурс-П, дата съемки – 30 сентября 2018 г.

В верхней свободной излучине выпуклым является левый пойменный берег. В нижней вынужденной излучине выпуклым является правый пойменный берег, а нижнее крыло излучины пролегает вдоль левого крутого трудноразмываемого коренного склона долины Оби. Поэтому излучина и называется «вынужденной», трудноразмываемый берег вынуждает речной поток, подходящий к нему под углом, сделать поворот и следовать вдоль берега. Водозабор №2 располагается на левом берегу, в вершине этой излучины. Правый пойменный берег в смежных крыльях излучин – обрывистый, достаточно интенсивно размываемый. К выступающему левобережному пойменному сегменту прилегает крупная надводная (в условиях межени) аккумулятивная русловая форма. Выше

по течению к рассматриваемому участку примыкает еще одна свободная излучина, а ниже него располагается слабоизогнутый стабильный сегмент русла.

Для оценки текущего состояния и прогнозирования развития излучин используется ряд величин (параметров), характеризующих их форму [3, 4]. Набор таких параметров применительно к вынужденной излучине представлен на рисунке 1.2.

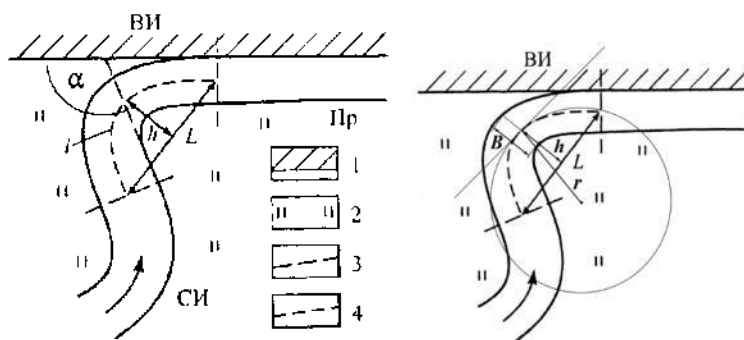


Рисунок 1.2 – Схема для определения параметров вынужденной излучины: ВИ – вынужденная излучина; СИ – свободная излучина; Пр – прямолинейный участок русла; 1 – коренной берег; 2 – пойма; 3 – границы вынужденной излучины; 4 – геометрическая ось русла. Параметры вынужденной излучины: α – угол встречи потока с коренным берегом; L – шаг излучины; l – длина излучины; h – стрела прогиба излучины; r – радиус кривизны излучины; B – ширина русла в вершине излучины; l/L – степень выраженности излучины [3]

Верхняя граница вынужденной излучина располагается в точке перегиба геометрической оси русла, т.е. линии равноотстоящей от его боковых границ (берегов). Длина нижнего крыла вынужденной излучины принимается равной длине его верхнего крыла. Угол встречи (α) определяется между линией коренного берега, направленной сверху вниз по течению, и касательной к линии выпуклого берега излучины в верхнем ее крыле перед поворотом русла [3]. Конфигурация береговой линии принимается для условий межени [4].

Процесс эволюции вынужденных излучин достаточно хорошо изучен. На рисунке 1.3 представлена разработанная Р.С. Чаловым схема последовательных стадий развития такой излучины с характерными значениями параметров, соответствующих каждой стадии. Процесс развития вынужденной излучины заключается в постепенном увеличении крутизны ее верхнего крыла относительно коренного берега с дальнейшим его «заваливанием», и, итоговым спрямлением излучины. Причем возможность такого спрямления возникает уже на третьей стадии ее развития, когда значение угла встречи превышает 75° . На первых этапах эволюции вынужденной излучины (стадии I – III) происходит также смещение излучины вниз по течению, однако затем этот процесс ослабевает, и, увеличение крутизны верхнего крыла становится преобладающим.

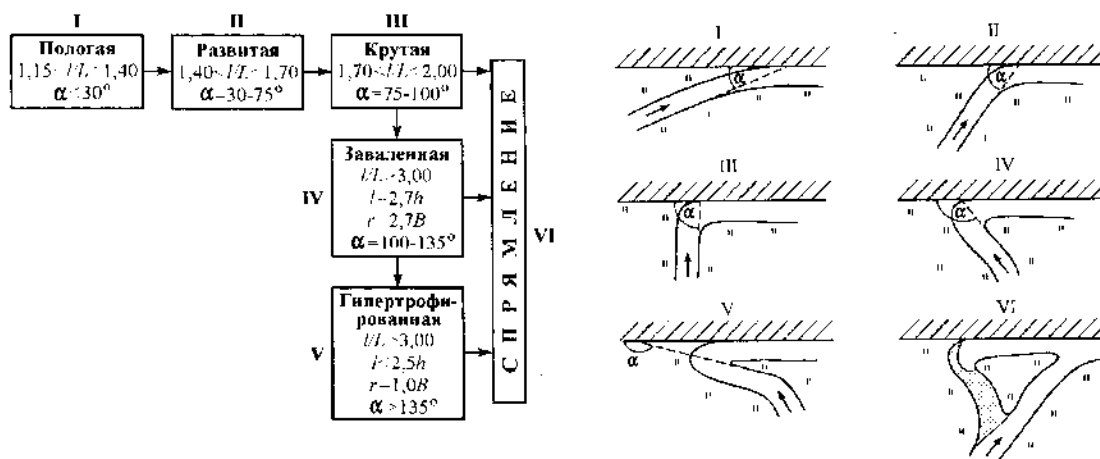
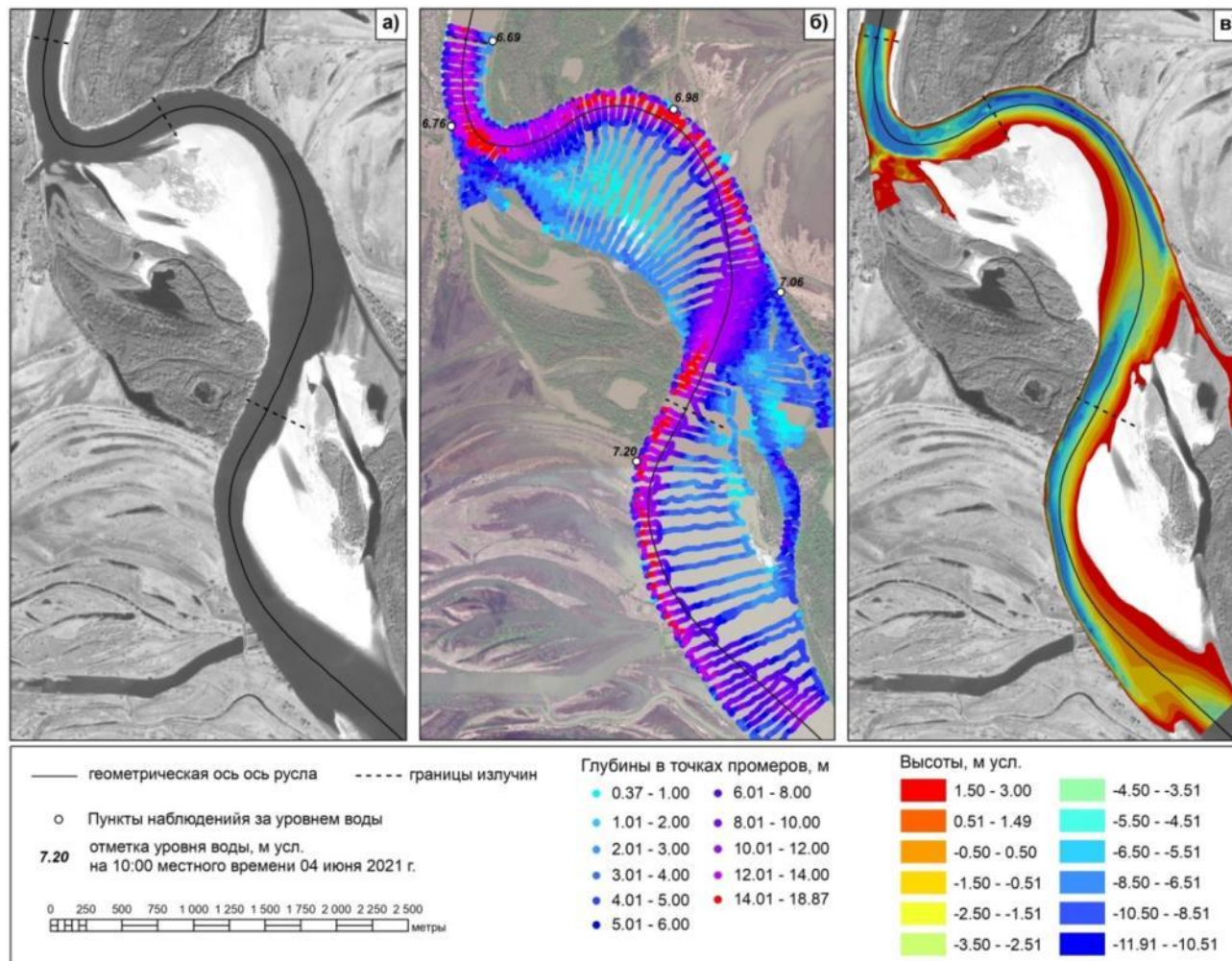


Рисунок 1.3 – Стадии развития вынужденной излучины по Р.С. Чалову [3]

В 2018 году на основе анализа ретроспективных данных и оценки текущих параметров рассматриваемой вынужденной излучины нами был сделан вывод о том, что она находится на IV (предпоследней) стадии своего развития [5]. Отметим, что на этой стадии, как видно из рисунка 1.3, уже возможно спрямление излучины.

Очевидно, что спрямление вынужденной излучины будет являться полной катастрофой для водозабора №2, который служит, насколько известно, основным источником питьевого водоснабжения города Барнаула. Одним из возможных сценариев спрямления является перемещение основного руслового потока в протоку, берущую начало в конце нижнего крыла свободной излучины на рассматриваемом участке. Эта протока (Ерестнинская) впадает в основное русло около водозабора №1 (рисунок 1.1). При размыве пойменного массива в ходе разработки протоки будут высвобождаться значительные объемы наносов. Наиболее вероятное место их последующего отложения – устье протоки, т.е. район водозабора №1, который и без этого испытывает существенные трудности в своей работе [1, б].

Для получения информации о текущем состоянии русла на рассматриваемом участке и оценки произошедших за последние несколько лет (с 2018 г.) изменений его рельефа и конфигурации в период с 1 по 4 июня 2021 года был проведен комплекс натурных исследований. Он включал в себя рекогносцировочное обследование, гидрографическую съемку и наблюдения за отметками уровня воды. Измерения уровней воды проводились во время промерных работ на оборудованных нами шести временных постах свайного типа, рассредоточенных по протяжению исследуемого участка. Все посты имеют привязку к Балтийской системе высот. Результаты выполненных работ представлены на рисунке 1.4. Общая характеристика гидрологического режима реки Обь в районе города Барнаула за период открытой воды 2021 года приведена на рисунке 1.5.



Подложка – снимок спутника Канопус-В5, дата съемки – 03 сентября 2021 г. (а, в); космический снимок из коллекции Google Digital Globe, дата съемки – 14 мая 2021 г. [7] (б)

Рисунок 1.4 – Русло р. Обь в районе водозабора №2 в 2021 г.: общий вид (а); глубины в половодье по данным промеров (б); рельеф (в)

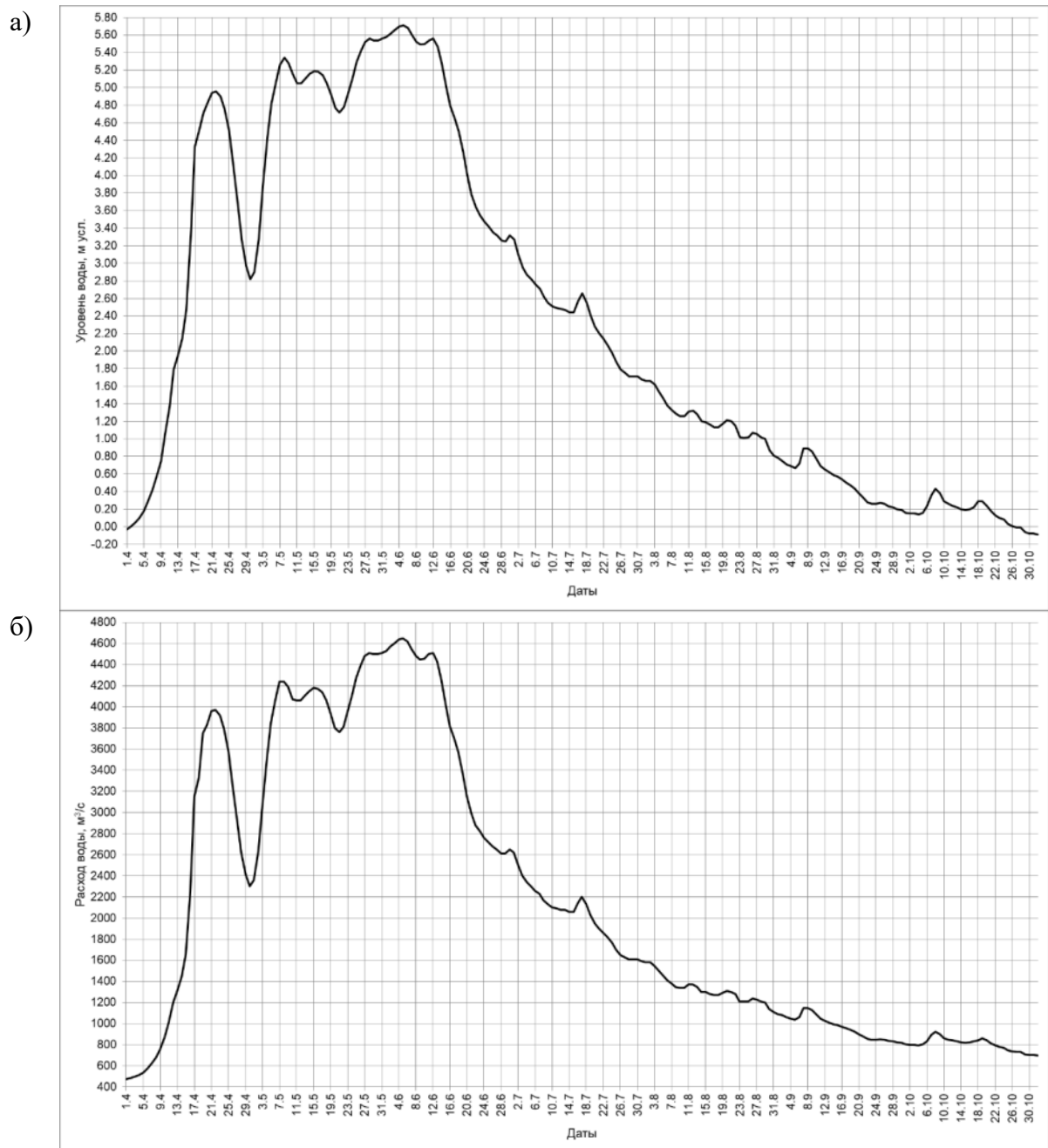


Рисунок 1.5 – Расходы (а) и уровни воды (б) р. Обь за период с 01 апреля по 01 ноября 2021 г. по данным гидрологического поста Барнаул Росгидромета [8]

Геометрическая ось русла и границы излучин, показанные на рисунке 1.4, определялись по космическому снимку спутника Канопус-В5, сделанному 03 сентября 2021 г., в соответствии с разработанной нами ранее методикой [5].

Отметим основные черты рельефа русла на рассматриваемом участке.

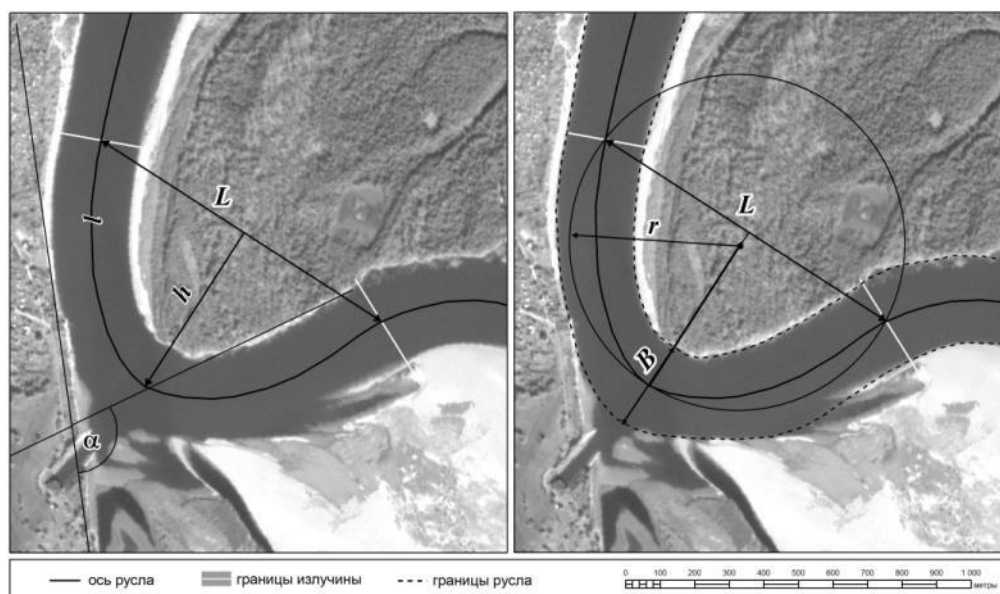
Вдоль вогнутых размываемых берегов свободных излучин пролегают самые глубокие, но относительно узкие плёсовые ложбины, причем нижние оконечности этих ложбин затрагивают и выпуклый участок того же берега в смежной излучине. Плёсовые ложбины разделены перекастом – относительно возвышенной (мелководной) областью дна

реки. Причем он существенно сдвинут вниз по течению от границы излучин (точки перегиба геометрической оси русла).

Прирусловые части выпуклых берегов в свободных излучинах заняты мощными песчаными массивами. Будем называть их для краткости «побочнями», хотя это и не совсем верно с точки зрения терминологии. Побочень, как вид русловых макроформ, соответствует иному типу руслового процесса [9]. Рассматриваемые же здесь песчаные образования являются, по сути, авангардной (наиболее динамичной) частью пойменного массива выпуклого берега излучины. В ходе эволюции излучины тыловая зона этой части постепенно покрывается травяной и древесной растительностью и присоединяется к основной территории поймы.

В рельефе русла вынужденной излучины, прежде всего, обращает на себя внимание глубоководная зона, локализованная в вершине излучины. Отметим, что такая же зона наблюдалась в сходных морфологических условиях и на участке реки у водозабора №1 [2, 6]. В верхнем крыле излучины можно выделить «перекат» - сравнительно возвышенный участок между оконечностью верхней плёсовой ложбины и привершинной глубоководной зоной. В данном случае он не столь ярко выражен, как в свободной излучине.

Основные параметры вынужденной излучины, согласно рисунку 1.3, определенные по состоянию на 2021 год, представлены в таблице 1.1. В этой же таблице указаны их значения, полученные в 2018 г [5]. Схема определения параметров применительно к рассматриваемой излучине показана на рисунке 1.6



Подложка – снимок спутника Канопус-В5, дата съемки –03 сентября 2021 г.

Рисунок 1.6 – Схема определения параметров вынужденной излучины р. Обь в окрестности Барнаульского водозабора №2

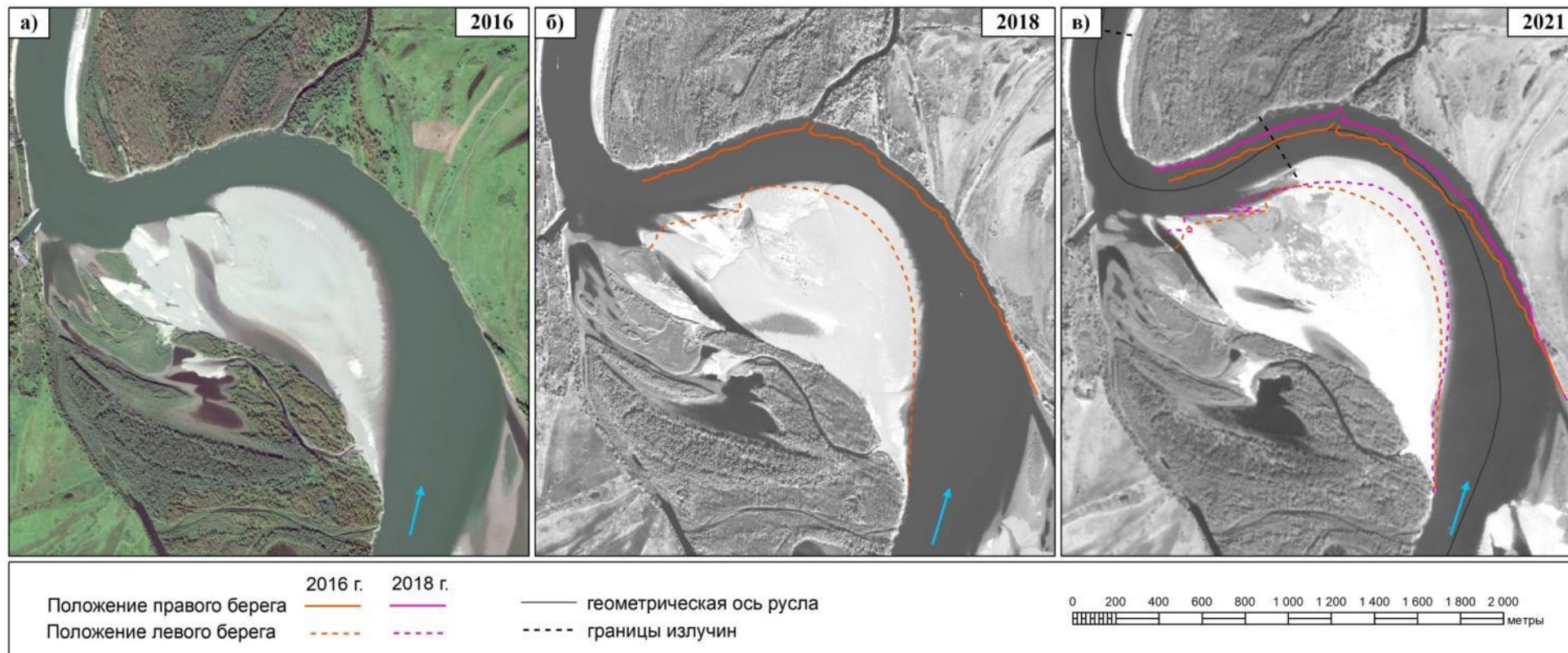
Таблица 1.1 – Значения параметров вынужденной излуины в окрестности Барнаульского водозабора №2 по состоянию на 2018 и 2021 гг.

Год	l , м	L , м	h , м	r , м	B , м	α°	l/L	l/h	r/B
2021	1504	967	529	483	266	108	1,56	2,84	1,82
2018	1668	1102	595	639	350	104	1,51	2,80	1,83

Различия в значениях параметров излуины, приведенных в таблице 1.1, вообще говоря, могут объясняться не только процессом её эволюции, но и различиями в основах, использованных для определения этих параметров. Весьма трудно подобрать картографические или спутниковые материалы за разные годы с идентичной ситуацией по уровням воды. Однако в данном случае эти различия не так уж велики. Значения параметров излуины на 2018 г. определены по космическому снимку от 30 сентября при отметке уровня воды на гидрологическом посту Барнаул 0,93 м усл. Снимок 2021 года сделан 03 сентября, при этом уровень воды на посту – 0,71 м усл. Отметим также, что для определения принадлежности текущего состояния излуины к той или иной стадии её развития используются в основном не абсолютные, а относительные величины (рисунок 1.3). Единственная абсолютная величина – угол встречи (α) от положения уровня воды практически не зависит и определяется вполне надежно.

Как видно из данных таблицы 1.1 и рисунка 1.3, в настоящее время рассматриваемая вынужденная излуина продолжает оставаться на предпоследней (IV) стадии своего развития. Относительные величины (l/L , l/h , r/B), определяющие принадлежность к этой стадии, мало изменились. В то же время наблюдается явное увеличение угла встречи – за три года (с осени 2018 по осень 2021 г.) на четыре градуса, то есть процесс «заваливания» верхнего крыла излуины, приближающий момент её спрямления, продолжается. Ранее нами была сделана оценка средней скорости увеличения угла встречи для данной излуины (1 градус/год) [5]. Новые данные с этой оценкой вполне согласуются.

Очевидно, что возрастание значение угла встречи (α) есть проявление процесса неуклонного размыва правого берега в смежных крыльях свободной и вынужденной излуин. Этот процесс достаточно наглядно представлен на рисунке 1.7. Из этого рисунка можно сделать, пусть и неочевидный, вывод об одновременном накоплении наносов на противоположном левобережном побочне. То, что это действительно так, показывает рисунок 1.8. На нём представлены изменения рельефа дна в зоне русла, охватывающей вершину левобережного побочня, за период с 2017 по 2021 г. Эти изменения получены на основе данных выполненных нами промерных работ, проводившихся как в рамках данного Проекта, так и в ходе других исследований.

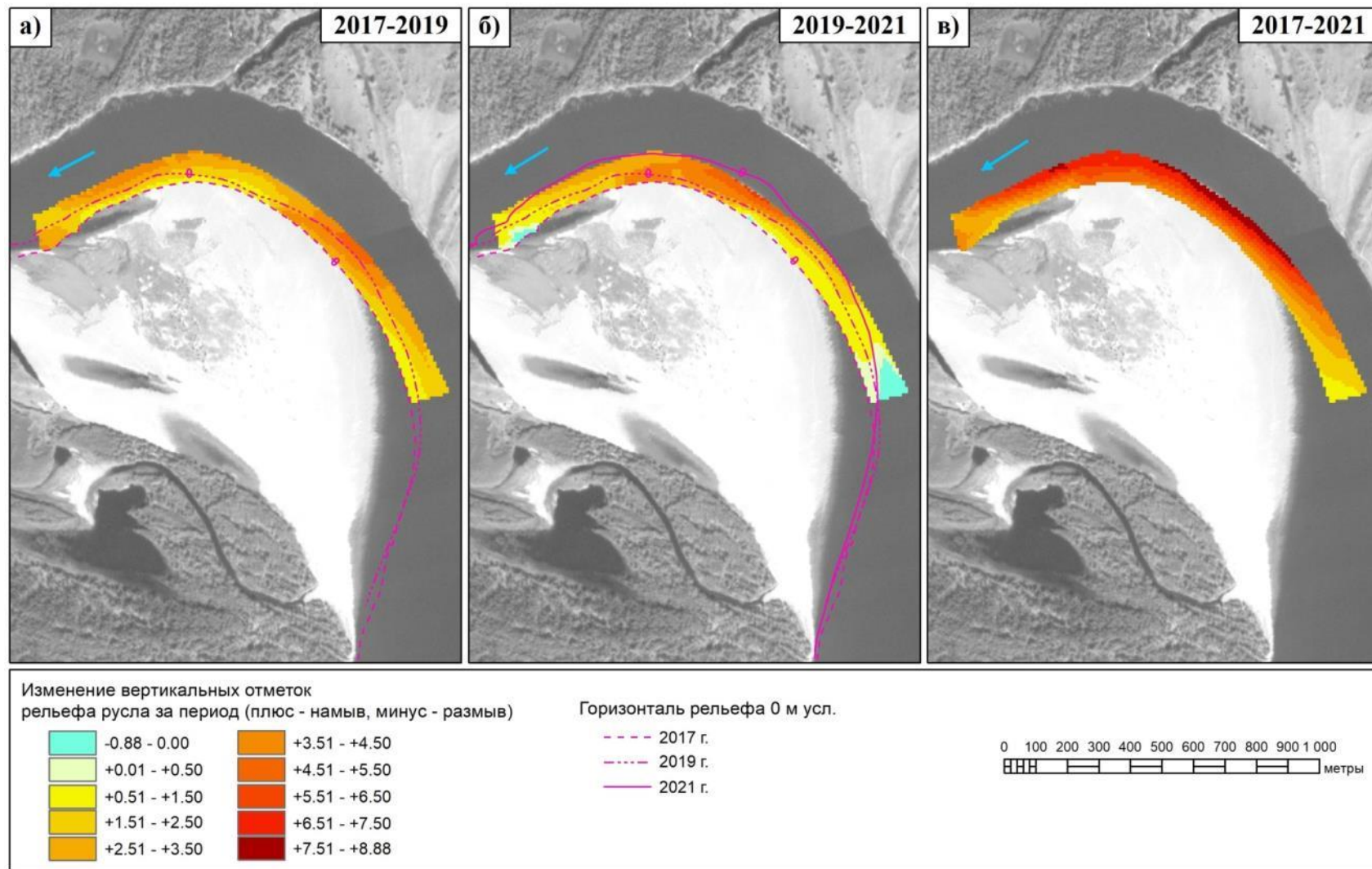


Подложка – космический снимок из коллекции Google Digital Globe, дата съемки – 07 сентября 2016 г. [7] (а); снимок спутника Ресурс-П, дата съемки – 30 сентября 2018 г. (б); снимок спутника Канопус-В5, дата съемки – 03 сентября 2021 г. (в)

Отметки уровня воды на гидрологическом посту Барнаул на даты космических снимков (м усл.):

07.09.2016 – 1,36; 30.09.2018 – 0,93; 03.09.2021 – 0,71 [8]

Рисунок 1.7 – Конфигурация русла р. Обь в окрестности водозабора №2 в 2016 (а), 2018(б) и 2021 (в) годах



Подложка – снимок спутника Канопус-В5, дата съемки – 03 сентября 2021 г.

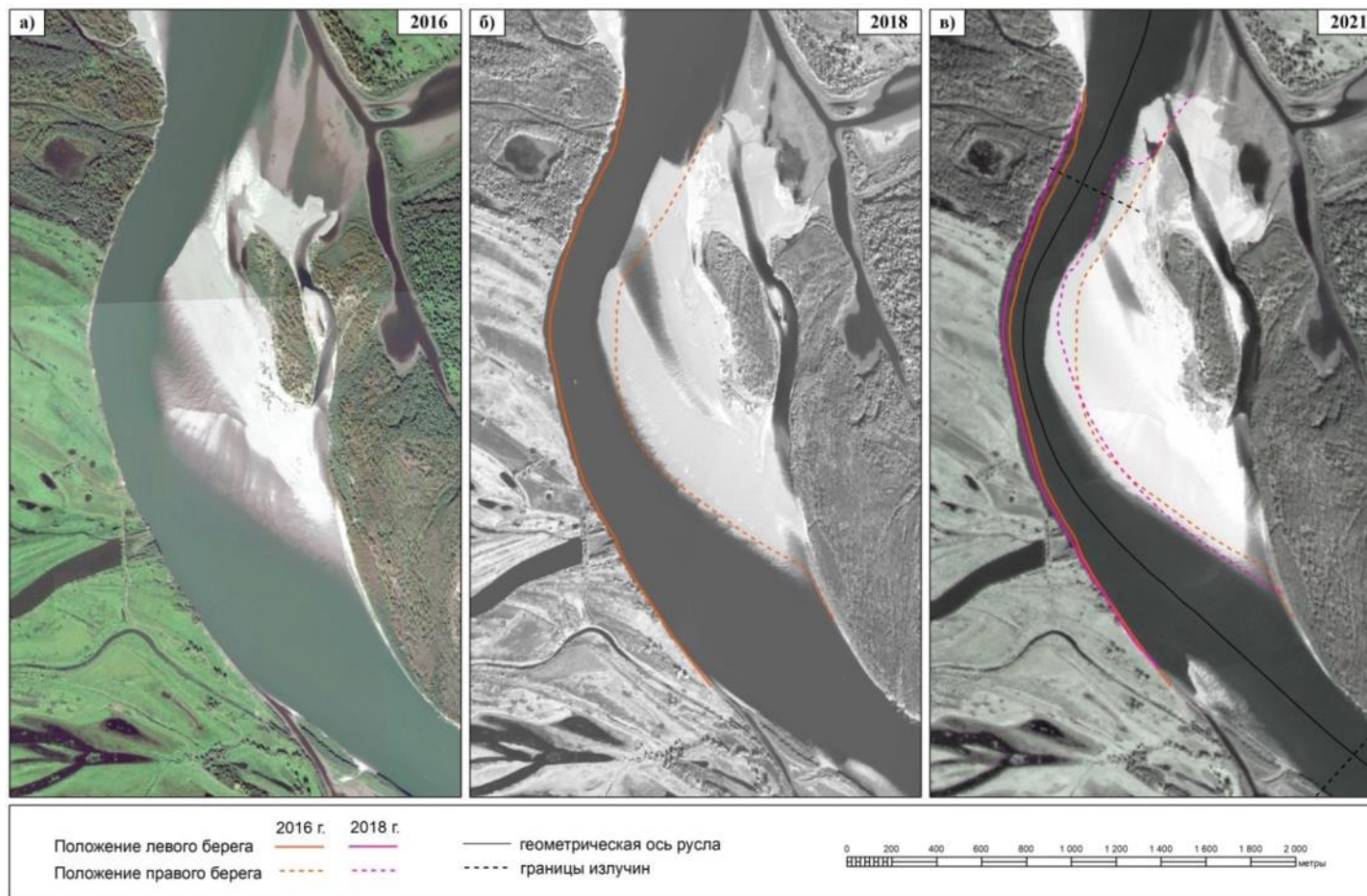
Рисунок 1.8 – Изменения рельефа русла в ограниченной зоне при вершине выпуклого берега выше водозабора №2 за период 2017 – 2019 гг. (а); 2019 – 2021 гг. (б); 2017 – 2021 гг. (в)

Как видно из рисунка 1.7 наибольшее отступление правого берега наблюдается на конечном участке нижнего крыла свободной излучины, прилегающем к границе с вынужденной излучиной. Здесь за пять лет (2016 – 2021 гг.) береговая линия сместилась вглубь поймы на 130 м, что дает среднегодовую скорость отступления 26 м/год. За три последних года (2018 – 2021 гг.) отступление берега составило 80 м, при средней скорости 27 м/год. В то же время в середине верхнего крыла вынужденной излучины за те же пять лет берег отступил на 80 м (16 м/год), причем за 2018 – 2021 гг. – на 40 м (13 м/год). Эти результаты хорошо согласуются с отмеченным выше фактом «заваливания» верхнего крыла вынужденной излучины, т.е. увеличением значения угла встречи (α). По нашему мнению, пока рано говорить о возрастании скорости этого процесса в последние несколько лет, однако, можно вполне определенно утверждать, что он продолжается, как минимум, с прежней интенсивностью.

Из рисунка 1.8 хорошо видно, что участок максимального размыва правого берега соответствует зоне наибольшего отложения наносов на противоположном берегу. Интересно отметить, что в рассмотренной на данном рисунке левобережной области русла, площадь которой составляет 15,6 га, в целом за период с июня 2017 по июнь 2021 г. было накоплено 614 тыс. м³ наносов.

Нам представляется, что именно этот процесс непрерывного накопления наносов на вершине левобережного побочня и является основным фактором эволюции рассматриваемой системы излучин. Отложение наносов, во-первых, приводит к их дефициту в потоке (содержание материала становится меньше физически возможной емкости потока). Во-вторых, аккумуляция наносов уменьшает глубины и, соответственно, живое сечение потока, что, в свою очередь, повышает среднюю скорость течения. Чтобы ликвидировать дефицит наносов и восстановить живое сечение русла река начинает размывать противоположный пойменный берег.

Откуда же берутся наносы, скапливающиеся на левобережном побочне в окрестности водозабора №2 в столь значительных объемах? Вряд ли они поступают сюда непосредственно с противоположного размываемого берега. Факт существования на широких реках устойчивого и сравнительно мощного течения, направленного перпендикулярно основному потоку, в научной литературе пока не признан. Наоборот, считается, что изымаемый с берега в ходе размыва материал откладывается у того же берега, но ниже по течению [9, 10]. Следовательно, наносы поступают в указанную на рисунке 1.8 зону с вышележащего участка реки. Здесь русло образует еще одну свободную излучину с вогнутым размываемым левым берегом (рисунок 1.1). Процесс эволюции этой излучины отражен на рисунке 1.9.



Подложка – космический снимок из коллекции Google Digital Globe, дата съемки – 07 сентября 2016 г. [7] (а); снимок спутника Ресурс-П, дата съемки – 30 сентября 2018 г. (б); снимок спутника Канопус-В5, дата съемки – 03 сентября 2021 г. (в)

Отметки уровня воды на гидрологическом посту Барнаул на даты космических снимков (м усл.):

07.09.2016 – 1,36; 30.09.2018 – 0,93; 03.09.2021 – 0,71 [8]

Рисунок 1.9 – Конфигурация русла р. Обь в свободной излучине, примыкающей сверху к системе излучин в окрестности водозабора №2, в 2016 (а), 2018(б) и 2021 (в) годах

Как видно из рисунка 1.9, в рассматриваемой излучине левый берег в ее вершине и нижнем крыле неуклонно размывается со средней скоростью около 10 м/год. С учетом приведенных выше данных можно также предполагать симметричное нарастание правого выпуклого берега.

Длина размываемого участка составляет около 1900 м. С 2016 по 2021 годы береговая линия в пределах этого участка отступила вглубь суши в среднем на 50 м. Средняя высота берегового склона, с учетом подводной части, составляет около 7 м (рисунок 1.4в). Тогда суммарный объем материала, изъятый с берега в результате его размыва за рассматриваемый период, можно оценить в 665 тыс. м³, что по порядку величины соответствует значению объема наносов, накопленных на левобережном побочне у водозабора примерно за тот же интервал времени.

Таким образом, можно предполагать, что постоянно размываемый берег данной излучины и является источником тех наносов, которые также неуклонно накапливаются на левобережном побочне (рисунок 1.8), и, тем самым, поддерживают процесс «заваливания» верхнего крыла вынужденной излучины, расположенной у водозабора №2 (рисунок 1.7).

Размыв берега в обсуждаемой свободной излучине также может быть объяснен накоплением наносов на противоположном выпуклом берегу (рисунок 1.9). А это накопление, в свою очередь, вероятно, обеспечивается размывом того же берега в вышележащей излучине и т.д.

В заключении следует обратить внимание еще на некоторые, по нашему мнению, интересные и важные факты.

На рисунке 1.10 показаны положение геометрической оси русла и границы излучин, определенные по космическим снимкам 2016, 2018, 2021 годов, которые уже использовались в предыдущем изложении.

Из рисунка 1.10 хорошо видно, что границы излучин по данным за различные годы весьма близки между собой. С учетом неизбежного произвола и неточностей, присущих примененной методике их определения [5], можно считать, что они практически совпадают в пространстве. Данный факт можно трактовать таким образом, что процесс смещения всей системы обсуждаемых здесь излучин, как целого, вниз по течению за последние пять лет не проявляется.

Отметим, что «сползание» серии излучин без существенного изменения их плановых очертаний весьма характерно для меандрирующих рек, особенно на ранних стадиях развития этого процесса [3, 4, 9]. Однако постоянство в местоположении границ излучин означает, что в настоящее время в морфодинамике русла на рассматриваемом

участке основным является не процесс смещения системы излучин, а процесс изменения плановых очертаний каждой излучины в системе, а именно, роста их кривизны. Об этом же говорят и изменения в конфигурации геометрической оси русла, показанные на рисунке 1.10.



Подложка – снимок спутника Канопус-В5, дата съемки – 03 сентября 2021 г.

Рисунок 1.10 – Геометрическая ось русла и границы излучин р. Обь в районе водозабора №2, построенные по спутниковым снимкам разных лет (рисунки 1.7, 1.9)

Отметим также, что геометрическая ось русла строилась по космическим снимкам, хотя и относящимся к одной и той же фазе гидрологического цикла (начало осенней межени), но сделанным в различных условиях по уровням воды, разность отметок которых превышает полуметра. Снимок 2021 года сделан при уровне воды на посту Барнаул 0,71 м усл., а снимок 2016 года – при отметке 1,36 м усл. Тем не менее, соответствующие конфигурации геометрической оси русла правильно отражают процесс его эволюции. Так что условие идентичности исходных материалов по уровням воды, вероятно, не столь уж и важно, тем более что на практике оно трудновыполнимо.

2. Крупность русловых наносов р. Обь на территории г. Барнаула

Морфодинамика речного русла, т.е. изменения его рельефа и плановых очертаний, обусловлены перемещением водным потоком рыхлого материала, слагающего русло (русловых наносов). Перемещение наносов, иначе говоря, транспорт наносов, количественно характеризуется величиной их расхода в массовом (кг/с) или объемном ($\text{м}^3/\text{с}$) выражении через заданное поперечное (перпендикулярное к направлению транспорта) сечение.

Подчеркнем, что речь идет о том рыхлом материале, который покрывает дно рек и образует различные русловые формы. Под действием течения он изымается из одного места, переносится потоком в другое место, как правило, на сравнительно небольшое расстояние и вновь откладывается, тем самым изменяя рельеф русла. Мельчайшие твердые частицы, постоянно находящиеся в потоке (внерусловые наносы), которые формируют его мутность, здесь не рассматриваются.

Русловые наносы представляют собой смесь частиц (гранул) различного размера. Однако в русловой морфодинамике принято рассматривать поведение этой смеси как единой субстанции, а не отдельных частиц, образующих её.

Неоднородность наносов по размерам частиц описывается интегральной функцией распределения вероятностей размера (диаметра) частиц. Эмпирический аналог такой функции строится в ходе гранулометрического анализа пробы наносов, когда эта проба просеивается через набор сит с ячейками различного диаметра (d), а вероятность выражается в отношениях веса части пробы, прошедшей через сито данного диаметра, к общему весу пробы. В большинстве случаев распределение вероятностей размеров частиц – логарифмически нормальное [11]. Его параметрами служат математическое ожидание величины $lg(d)$ и коэффициент вариации этой величины. Однако на практике принято пользоваться более простыми характеристиками распределения – диаметрами с определенной вероятностью неперевышения или, иначе, *процентными диаметрами* (d_{10} , d_{50} , d_{90} и т.п.). Например, 50%-диаметр или медианный диаметр (d_{50}) означает, что 50% веса пробы мельче указанной величины.

Размеры частиц являются одним из главных факторов, определяющих процессы их перемещения водным потоком. Поэтому параметры, характеризующие крупность русловых наносов (процентные диаметры), входят во все известные расчетные зависимости для определения их расхода, которые, в свою очередь, обязательно присутствуют в любой математической модели морфодинамики речного русла [11, 12].

На предыдущих этапах работ по проекту уже были получены некоторые натурные данные о крупности русловых наносов на участке р. Обь в пределах территории г. Барнаула [1]. Однако из-за малого количества проб и их пространственной ограниченности эти данные нельзя признать достаточными для построения адекватной морфодинамической модели.

Поэтому в августе – сентябре 2021 г. был выполнен специальный комплекс натуральных и камеральных работ, а именно, отбор проб русловых наносов, их гранулометрический анализ и определение по результатам этого анализа (по эмпирическим кривым распределения) значений характерных параметров (процентных диаметров), наиболее часто встречающихся в формулах для расчета расхода наносов.

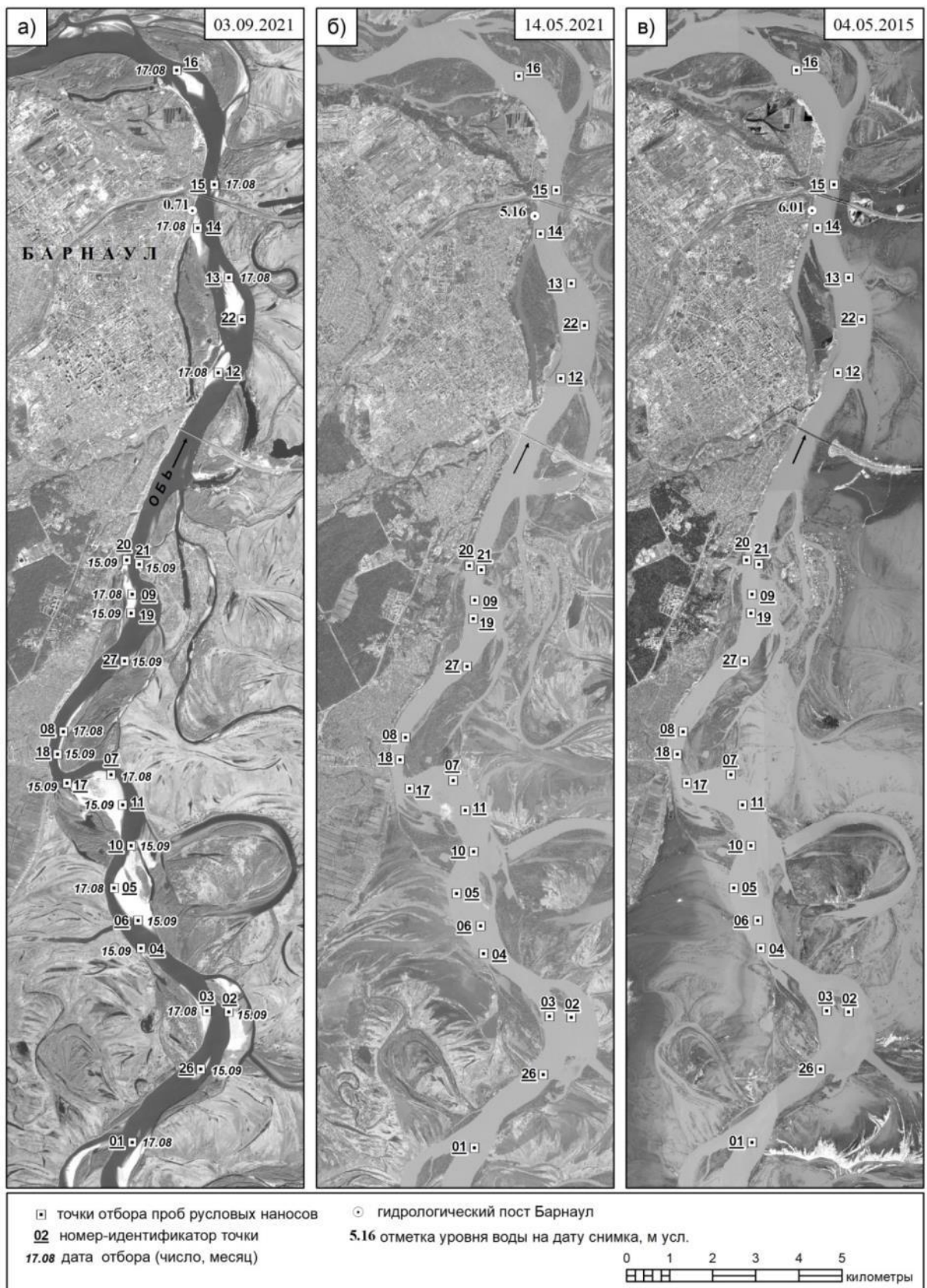
Отбор проб наносов производился двумя сериями – 17 августа и 15 сентября на участке реки Обь протяженностью 30 км в гидрологических условиях постепенного перехода к осенней межени (рисунок 1.5).

Точки отбора проб располагались на осушенной поверхности различных русловых форм (кос, пляжей, осередков и островов), по возможности, на незначительном удалении от уреза воды (рисунки 2.1, 2.2). В условиях половодья эти места обычно затоплены, причем, как показывают наши наблюдения прошлых лет, на значительную глубину [1, 2].

В каждой точке отбиралось три пробы: с поверхности русловой формы и с глубин 25 и 50 см от поверхности.

Такая схема отбора изначально не предполагала изучение распределения параметров крупности наносов по вертикали, а была обусловлена лишь стремлением повысить репрезентативность выборки в точке. По данным натуральных наблюдений амплитуда вертикальных деформаций русла за сезон открытой воды может составлять несколько метров [1, 2], так что для исследования именно вертикальной дифференциации русловых наносов глубины отбора проб должны иметь тот же порядок. В нашем случае можно говорить лишь о характеристиках крупности русловых наносов в их поверхностном слое.

Номера-идентификаторы точек отбора, указанные на рисунке 2.1, будут использоваться далее по тексту для указания на нужную точку (например, *точка №17*). Для ссылки на конкретную пробу, отобранную в данной точке, будут указываться номер точки и горизонт (глубина) отбора пробы. Например, записи *проба №17-00*, *проба №17-25*, означают, что речь идет о пробах, отобранных в точке №17 с поверхности и с глубины 25 см соответственно.



Подложка – космические снимки, характеризующие состояние русла реки в различных гидрологических условиях: снимок спутника Канопус-В5 (а); космические снимки из коллекции Google Digital Globe [7] (б, в)

Рисунок 2.1 – Местоположение точек отбора проб русловых наносов на участке р. Обь у г. Барнаула в августе – сентябре 2021 г.

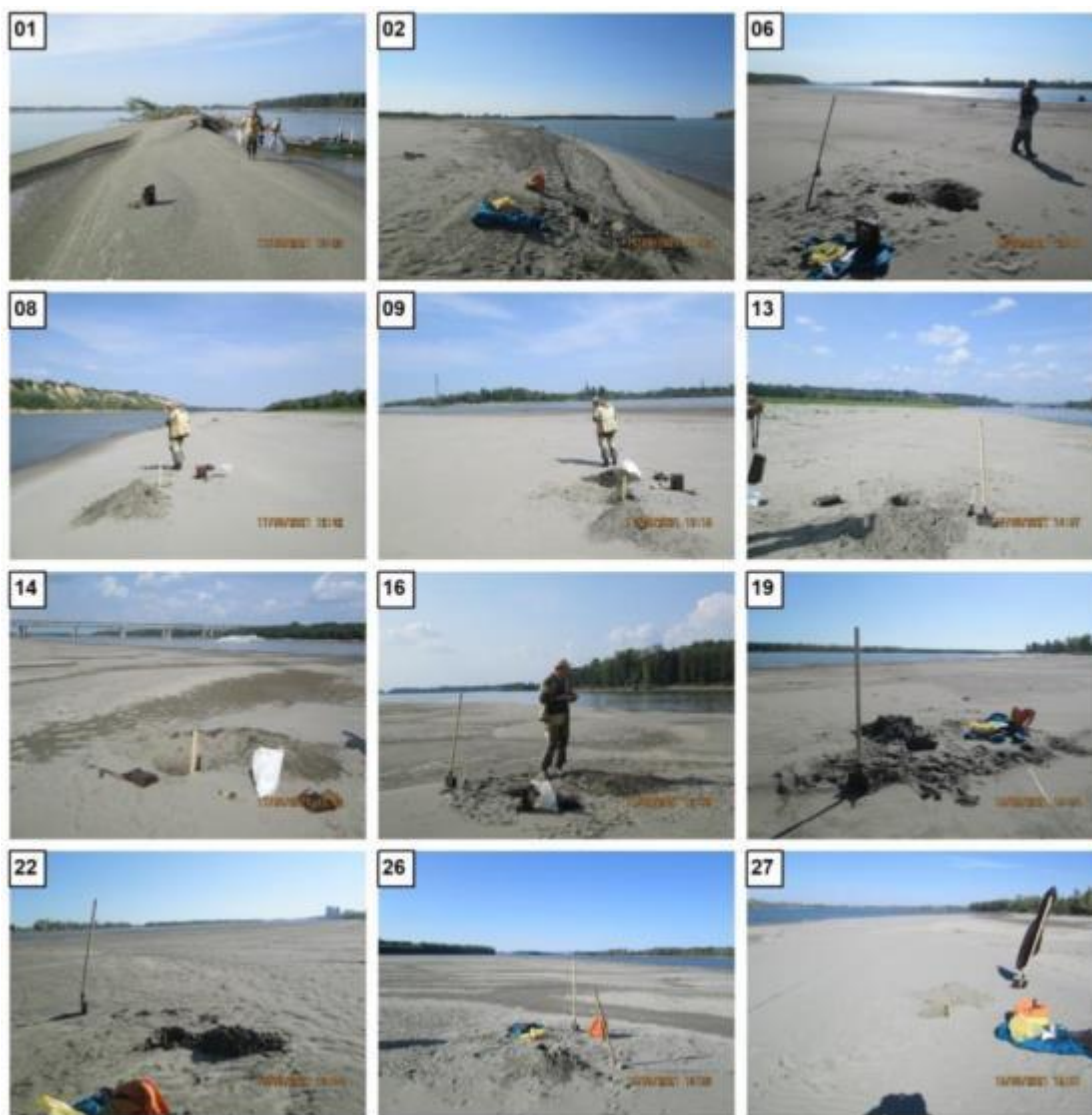


Рисунок 2.2 – Виды русла р. Обь в точках отбора проб. Номер на фотографиях соответствует номеру точки, указанному на рисунке 2.1

В точках №19 и №22 из-за незначительного возвышения поверхности русловой формы над урезом воды отобрать пробу с глубины 50 см не удалось, поскольку шурф затапливался водой (рисунок 2.2). Именно этим фактором вкуче со стремлением получить максимальное количество проб объясняется расположение некоторых точек отбора довольно далеко от уреза воды.

В точке №8 при проходке шурфа на глубине 50 см от поверхности встретился слой плотного (связного) глинистого грунта, и, проба с этого горизонта не отбиралась.

Собственно, процесс получения пробы состоял во вдавливании в рыхлый грунт открытой горловиной вниз «основной» алюминиевой банки из комплекта Полевой лаборатории Литвинова ПЛЛ-9 (рисунок 2.3).

Объем каждой отобранной пробы грунта в естественном состоянии составлял не менее 100 см³.

Всего было взято 69 проб в 24 точках.

Во всех пробах отобранный материал, по визуальной оценке, представлял собой песок. Примесей гравия и гальки совсем не наблюдалось. В некоторых пробах обнаруживались отдельные глинистые частицы размером 1 – 2 мм, которые при незначительном механическом усилии разрушались в пыль.

Собранные пробы высушивались естественным путем в камеральных условиях.

Гранулометрический анализ выполнялся с помощью комплекта сит, входящего в состав ПЛЛ-9. Этот комплект содержит сита с диаметрами отверстий в свету: 0,1 мм, 0,25 мм, 0,5 мм и 2 мм. Общие размеры каждого сита: диаметр рабочей поверхности – 90 мм, высота – 25 мм (рисунок 2.3).

Гранулометрический анализ заключался в просеивании пробы рыхлого грунта через батарею сит, поставленных друг на друга в порядке возрастания размера отверстия снизу вверх (рисунок 2.3), и определении доли (процента) веса фракции материала, оставшейся на каждом из сит и в поддоне, от общего веса пробы. Просеивание пробы осуществлялось вручную в течение 5 – 7 минут.

Определение общего веса пробы и весов фракций материала после просеивания производилось на электронных настольных весах МК-3.2-А22, имеющих погрешность измерений 0,25 грамма в интервале взвешивания от 1 до 250 грамм.



1-2 – основная алюминиевая банка из комплекта ПЛЛ-9; 3-6 – сита с размерами отверстий 2, 0,5, 0,25, 0,1 мм соответственно; 8 – батарея сит из комплекта ПЛЛ-9 в сборе; 9 – электронные настольные весы МК-3.2-А22

Рисунок 2.3 – Оборудование для гранулометрического анализа проб русловых наносов

Оптимальный объем анализируемой пробы определяется вместимостью сита (его общими размерами), способом просеивания (механически или вручную), точностью весов, а также особенностями гранулометрического состава исследуемого материала. С одной стороны, всегда есть стремление увеличить объем пробы, чтобы фракции с относительно малым процентным содержанием надежно определялись. С другой стороны, при преобладании в смеси частиц определенного диапазона крупности материал скапливается на одном из сит в значительном количестве, затрудняя поступление более мелких частиц на нижележащие сита, и, соответственно, процесс просеиванию требует больше времени и усилий.

Опытным путем было установлено, что такой оптимальный объем пробы в нашем случае составляет примерно 56 см³ сухого рыхлого материала (одна полная основная банка ПЛЛ-9). При этом вес материала в анализируемых пробах имел значения 75 – 90 грамм.

Рисунок 2.4 дает некоторое представление о форме и размерах частиц наносов.

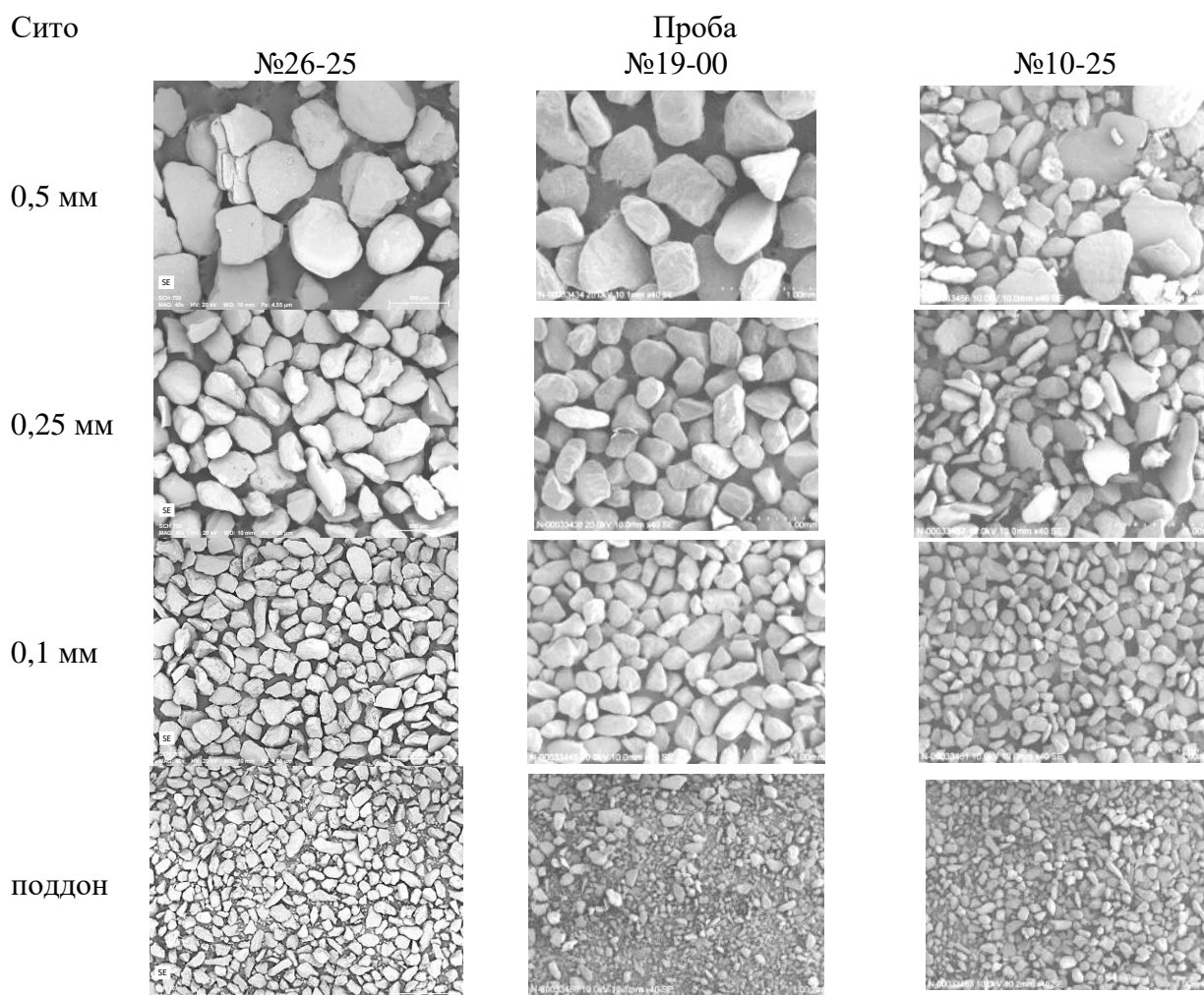


Рисунок 2.4 – Фотографии фрагмента фракций наносов, остающихся на ситах в ходе гранулометрического анализа, сделанные на электронном микроскопе Hitachi S-3400N (исходное увеличение снимков 40X)

По данным гранулометрического анализа каждой пробы строилась эмпирическая функция распределения размеров частиц в ней $F(d)$, показывающая процентное содержание фракции с размером частиц меньше d в общем весе пробы.

Суммируя значения веса фракций на соответствующих ситах для проб, принадлежащих одной точке, можно построить функцию распределения в целом для точки. Аналогичный подход использован и для получения обобщенных функций распределения, как для всего набора данных, так и для отдельных групп точек.

При построении эмпирических функций распределения учитывался тот факт, что после просеивания каждой пробы сито с диаметром отверстий 2 мм всегда оставалось пустым, то есть $F(d) = 100\%$ для $d = 2$ мм. В пробе №27-50 материал отсутствовал также и на сите 0,5 мм.

Значение d , при котором $F(d) = 0$, вычислялось по известным значениям путем линейной экстраполяции:

$$\lg(d_0) = \lg(d_2) - F_2 \frac{\lg(d_1) - \lg(d_2)}{F_1 - F_2}, \quad d_2 > d_1, \quad F(d_0) = 0 \quad (2.1)$$

где d – размера частиц (отверстий сита) в миллиметрах;
 $F(d)$ – значение эмпирической функции распределения для данного размера в процентах.

Примеры построенных эмпирических функций распределения представлены на рисунках 2.5, 2.6.

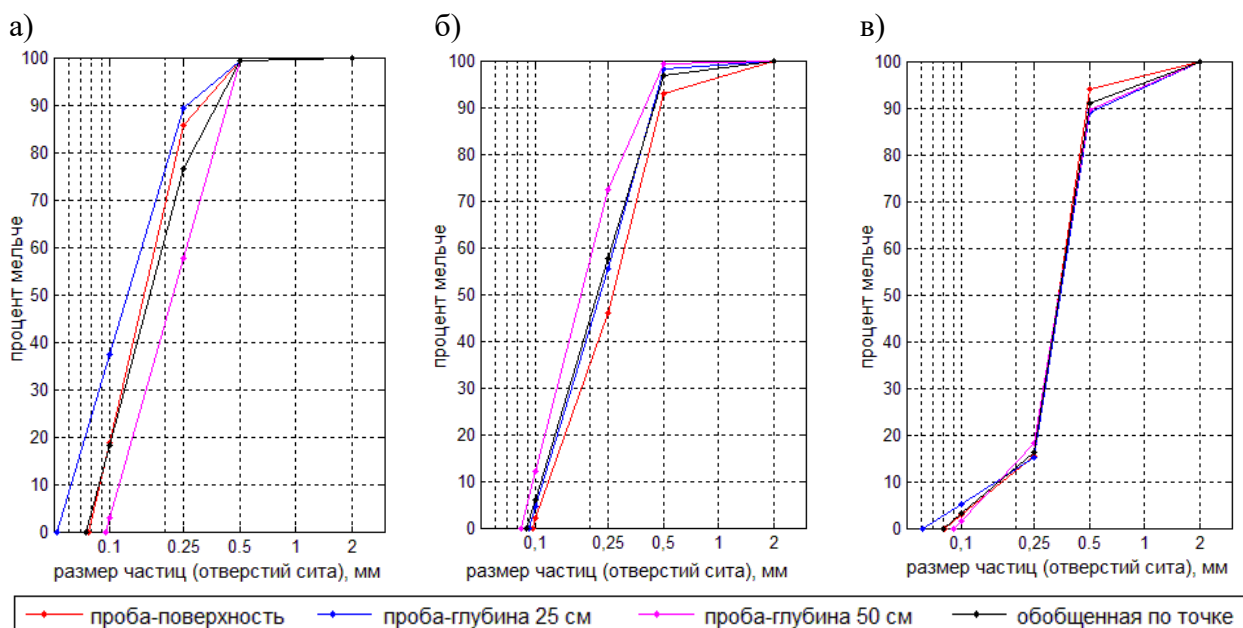


Рисунок 2.5 – Эмпирические функции распределения, построенные по результатам гранулометрического анализа проб русловых наносов, отобранных в точках №10 (а), №14 (б) и №20 (в)

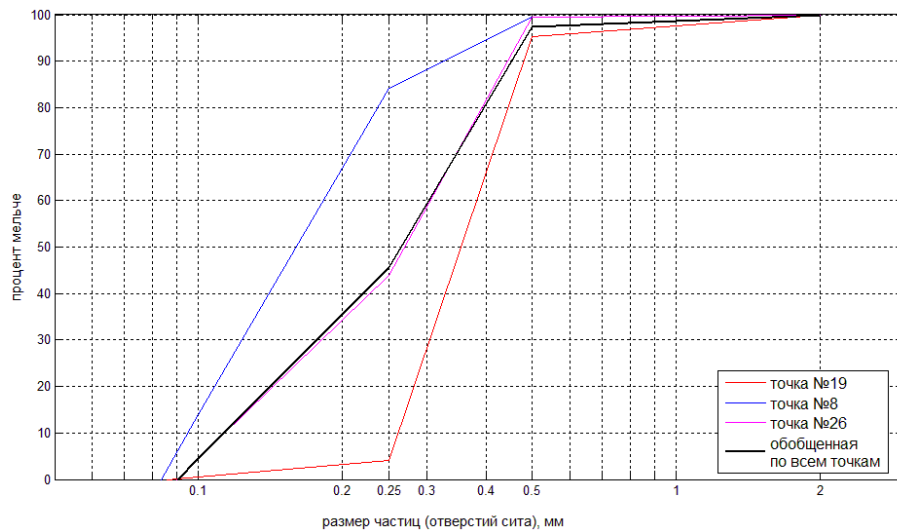


Рисунок 2.6 – Обобщенные эмпирические функции распределения для отдельных точек отбора проб и в целом по набору точек

По построенным эмпирическим функциям распределения находились значения следующих процентных диаметров – d_{10} , d_{50} , d_{90} .

В теоретическом логарифмически нормальном распределении медиана (d_{50}) совпадает с математическим ожиданием (средним значением), а величина d_{90}/d_{10} характеризует его дисперсию, поскольку для теоретического распределения имеют место следующие соотношения [12]:

$$d_{90} = \sigma^{1.3} d_{50}, \quad d_{10} = \sigma^{-1.3} d_{50}, \quad \frac{d_{90}}{d_{10}} = \sigma^{2.6} \quad (2.2)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение (квадратный корень из дисперсии).

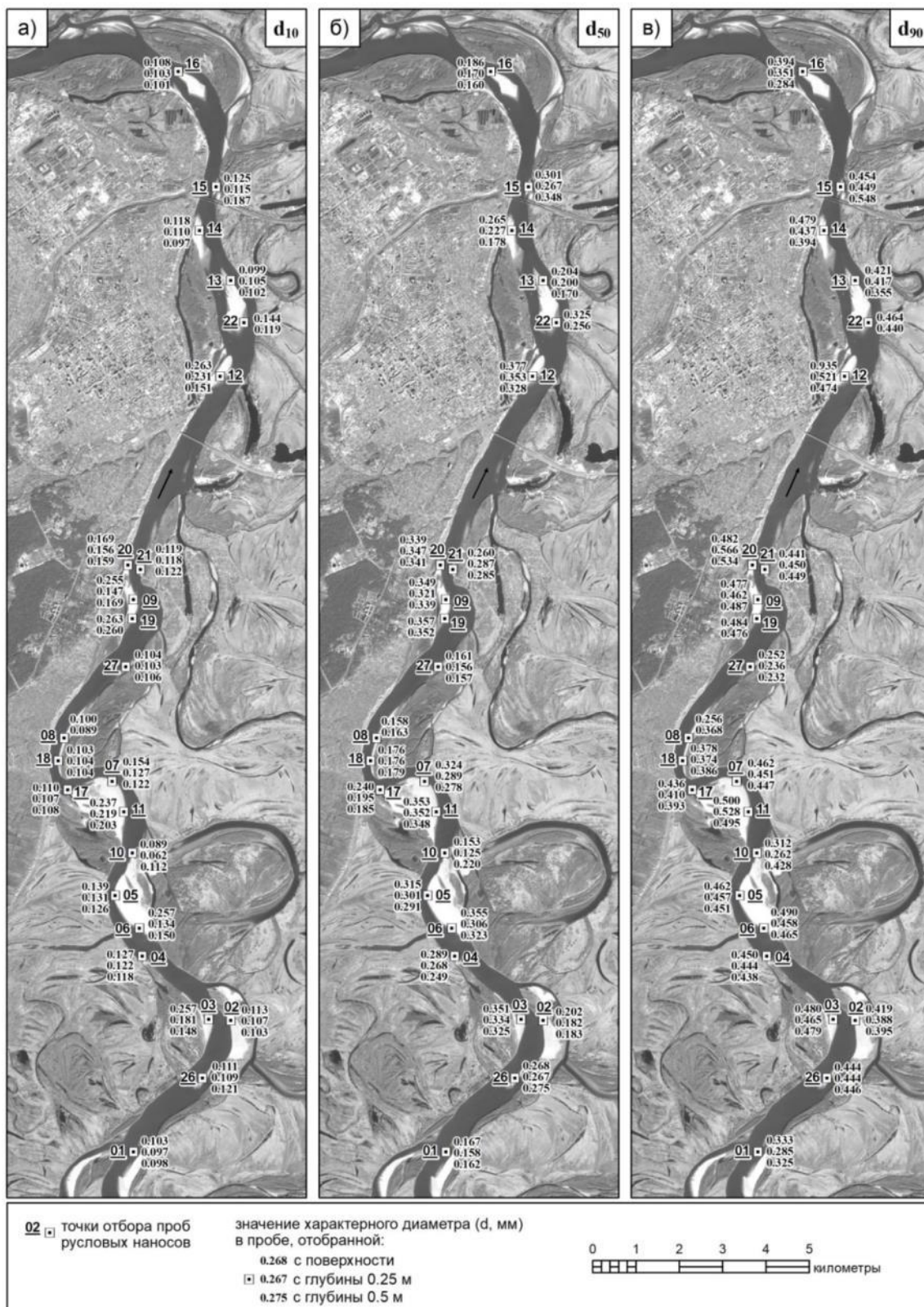
Кроме того, как уже говорилось выше, параметры d_{50} и d_{90} используются в формулах расхода наносов, первый – практически всегда, второй – весьма часто.

Получить значения искомых процентных диаметров непосредственно в ходе гранулометрического анализа не удалось, поскольку экспериментальные точки не попадали на нужные линии ординат. Поэтому величины d_{10} , d_{50} , d_{90} находились по эмпирическим функциям распределения линейной интерполяцией между известными (экспериментальными) значениями, а именно:

$$\lg(d_x) = \lg(d_1) + (X - F_1) \frac{\lg(d_2) - \lg(d_1)}{F_2 - F_1}, \quad d_2 > d_x > d_1, \quad F_2 > X > F_1 \quad (2.3)$$

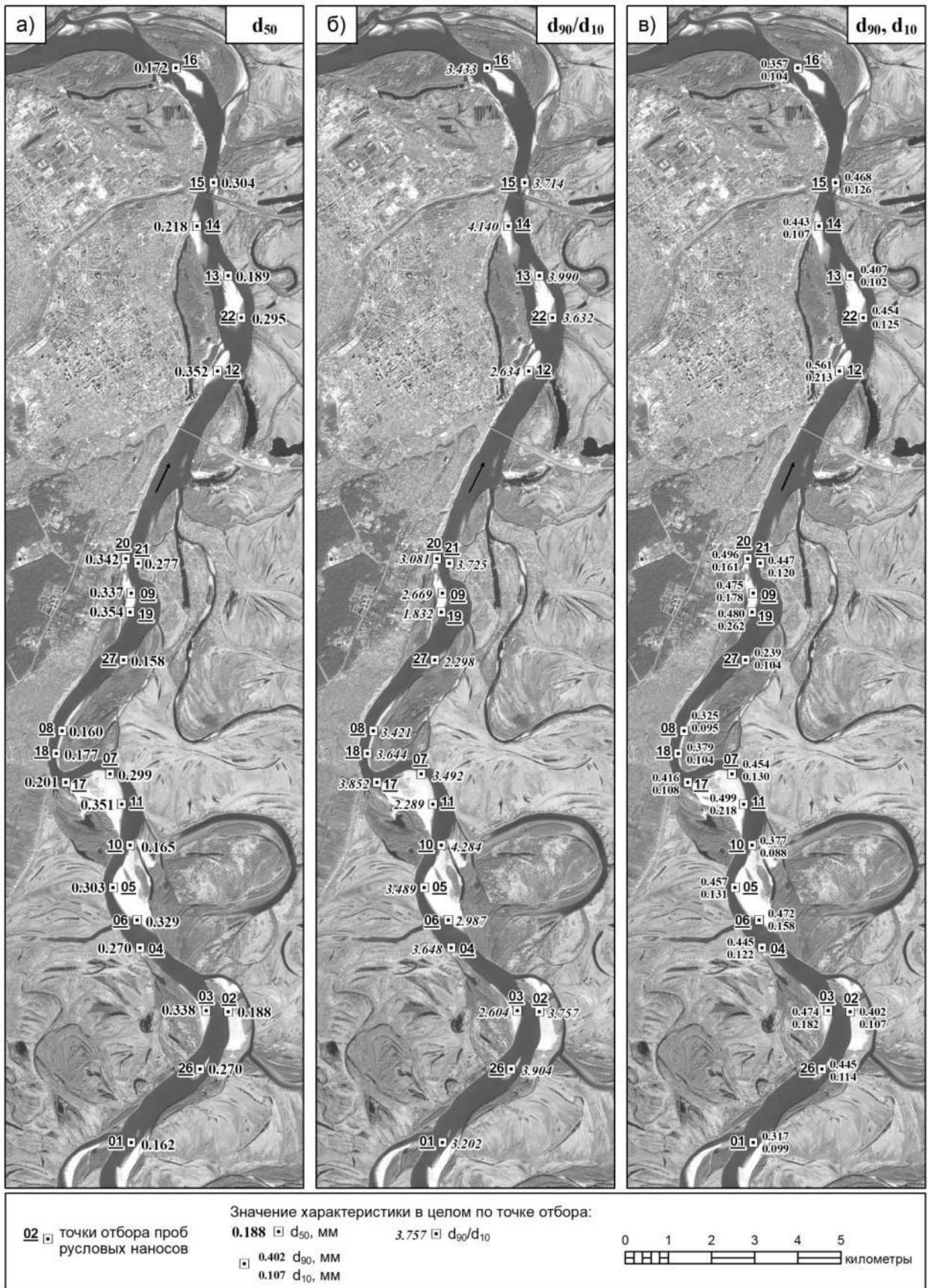
- где d – размера частиц (отверстий сита) в миллиметрах;
 $F(d)$ – значение эмпирической функции распределения для данного размера в процентах;
 X – искомый процент непревышения (значение функции распределения).

Результаты расчетов значений d_{10} , d_{50} , d_{90} для проб и в целом для точек представлены на рисунках 2.7 и 2.8, а для пространственных групп точек - в таблице 2.1.



Подложка – снимок спутника Канопус-В5, дата съемки 03 сентября 2021 г.

Рисунок 2.7 – Значения процентных диаметров d_{10} , d_{50} , d_{90} по эмпирическим функциям распределения для проб русловых наносов, отобранных на участке р. Обь у г. Барнаула в августе – сентябре 2021 г.



Подложка – снимок спутника Канопус-В5, дата съемки 03 сентября 2021 г.

Рисунок 2.8 – Значения процентных диаметров d_{10} , d_{50} , d_{90} по обобщенным эмпирическим функциям распределения для точек отбора проб

Таблица 2.1 – Значения процентных диаметров d_{10} , d_{50} , d_{90} по обобщенным эмпирическим функциям распределения для пространственных групп точек

Участок русла реки	Группа точек	Кол-во точек	d_{10} , мм	d_{50} , мм	d_{90} , мм
Весь участок отбора проб	Весь набор	18	0,113	0,265	0,453
Выше нового автомобильного моста	Весь набор, исключая точки №12 – 16, 22	18	0,114	0,267	0,453
Ниже нового автомобильного моста	Точки 12 – 16, 22	6	0,112	0,259	0,456
Водозабор №1	Точки №9, 19-21, 27	5	0,123	0,296	0,466
Водозабор №2	Точки №7, 10, 11, 17, 18	5	0,108	0,246	0,448
Участок трех излучин выше водозабора №2	Точки № 4 – 8, 10, 11, 18	9	0,112	0,262	0,450

Значения процентных диаметров, как видно из рисунков 2.7 и 2.8, демонстрируют существенные вариации от пробы к пробе и от точки к точке. Тем не менее, для групп точек, покрывающих достаточно протяженные участки русла (два и более километра), они изменяются весьма незначительно. Из таблицы 2.1 можно заключить, что, в целом, величина d_{10} составляет примерно 0,11 – 0,12 мм; $d_{50} \approx 0,25 – 0,27$ мм; $d_{90} \approx 0,45 – 0,46$ мм. Несколько выбивается из этого ряда значение d_{50} , полученное для группы точек, расположенной у водозабора №1. Однако этот район, как уже неоднократно говорилось, имеет специфическую морфодинамику и испытывает существенные техногенные воздействия [1, 6].

Следует также отметить, что на тех участках, где наблюдается преимущественная аккумуляция (накопление) наносов (точки №№ 2, 10, 17, 18, 8, 27, 13, 16), их крупность относительно мала. Там же, где ведущим морфодинамическим процессом является размыв, например, на выпуклых берегах в верхних крыльях излучин (точки №6, 11, 19), крупность наносов существенно выше.

Обратимся теперь к вопросу о том, в какой мере вариации крупности русловых наносов оказывают влияние на результаты расчета их расхода.

В речных условиях наиболее значительная часть русловых наносов перемещается в форме «влекомых» наносов, т.е. путем качения по поверхности дна, сальтации (коротких прыжков) или в виде скользящего по его поверхности слоя, концентрация частиц в котором близка к плотности их упаковки в состоянии покоя. При таком движении частицы наносов не удаляются далеко от поверхности дна и не теряют контакта с ним на длительное время. Процесс перемещения влекомых наносов осуществляется практически на всем протяжении периода открытой воды [10].

На сегодняшний день существует несколько десятков формул для расчета расхода влекомых наносов, как отечественных, так и зарубежных авторов [9, 11, 12]. Рассмотрим здесь две такие зависимости, которые достаточно часто используются для решения практических задач: формулу Гришанина, называемую также формулой ЛИВИТа, и формулу Ван Рейна (*Van Rijn*) 1984 г.

Формула Гришанина имеет вид (цитируется по [13]):

$$q = 0.015 \left(\frac{U}{U_{cr}} \right)^3 d_{50} (U - U_{cr}) \quad (2.4)$$

где q – расход наносов через поперечное сечение единичной длины, м³/с·м;
 U – осредненная по глубине скорость течения, м/с;
 U_{cr} – «критическое» значение скорости течения, при котором начинается перемещение материала, м/с;
 d_{50} – медианный диаметр наносов, м.

Для вычисления критической скорости в выражении (2.4) применяется соответствующая формула Гончарова [13]:

$$U_{cr} = 0.96 \sqrt{g} (d_{50} + 0.0014)^{0.3} \left(\frac{d_{50}}{d_{90}} h \right)^{0.2} \quad (2.5)$$

где U_{cr} – «критическое» значение скорости течения, при котором начинается перемещение материала, м/с;
 d_{50} – медианный (50%) диаметр наносов, м;
 d_{90} – 90% диаметр наносов, м;
 h – глубина потока, м;
 g – ускорение свободного падения, м/с².

Формула Ван-Рейна 1984 г. имеет вид [12]:

$$q = 0.005 \cdot U h \cdot \left(\frac{U - U_{cr}}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) g d_{50}}} \right)^{2.4} \cdot \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{1.2} \quad (2.6)$$

где q – расход наносов через поперечное сечение единичной длины, м³/с·м;
 U – осредненная по глубине скорость течения, м/с;
 U_{cr} – «критическое» значение скорости течения, при котором начинается перемещение материала, м/с;
 d_{50} – медианный диаметр наносов, м;
 h – глубина потока, м;
 ρ_s – плотность наносов, кг/м³;
 ρ – плотность воды, кг/м³;
 g – ускорение свободного падения, м/с².

Критическая скорость в формуле Ван Рейна для наносов с медианным диаметром, лежащим в интервале 0,1 – 0,5 мм, определяется как:

$$U_{cr} = 0.19(d_{50})^{0.1}lg\left(\frac{12h}{3d_{90}}\right) \quad (2.7)$$

где U_{cr} – «критическое» значение скорости течения, при котором начинается перемещение материала, м/с;
 d_{50} – медианный (50%) диаметр наносов, м;
 d_{90} – 90% диаметр наносов, м;
 h – глубина потока, м;
 g – ускорение свободного падения, м/с².

Как видно из выражений (2.4) – (2.7) рассматриваемые формулы используют один и тот же набор параметров, описывающих водный поток и наносы, а также имеют весьма сходную общую структуру. В них расход наносов является функцией от величины превышения скорости потока над ее критическим значением, т.е. $q \approx f(U-U_{cr})$. Такое сходство, помимо широкого практического использования и различного происхождения (отечественное / зарубежное), и обусловило выбор именно этих формул для дальнейшего анализа.

В формуле Гришанина (2.4) ускорение свободного падения (g) и относительная плотность наносов (ρ_s/ρ), которую для песчаных наносов можно принять постоянной, вероятно, уже учтены в эмпирическом числовом коэффициенте (0,015). То же самое можно сказать и о выражении Ван Рейна для критической скорости. Существенным отличием формулы Ван Рейна (2.6) от формулы Гришанина (2.4) состоит в том, что в ней присутствует глубина потока (h) в явном виде, причем это отличие будет нарастать с увеличением глубины потока. С другой стороны, отсутствие глубины потока в формуле Гришанина не должно смущать, поскольку речь идет о транспорте влекомого наносов, который определяется в основном характеристиками потока в придонном слое (касательным напряжением на дне) [11].

Для анализа чувствительности этих формул расхода наносов к характеристикам их крупности рассмотрим три варианта таких характеристик, взятых из представленных выше натуральных данных. Описание этих вариантов представлено в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Варианты характеристик крупности русловых наносов для расчета их расхода по формулам (2.4) и (2.6)

Вариант №	Группа точек / Точка	Процентные диаметры, мм		Примечание
		d_{50}	d_{90}	
1	Весь набор	0,265	0,453	Обобщенные данные по участку (таблица 2.1)
2	Точка №19	0,354	0,480	«Крупные наносы» (максимум d_{50}) (рисунок 2.8)
3	Точка №8	0,160	0,325	«Мелкие наносы» (рисунок 2.8)

Следует отметить, что наименьшее значение медианного диаметра для точки наблюдается в точке №27 (рисунок 2.8). Однако в таблицу 2.2 была включена точка №8, поскольку при мало отличающихся значениях d_{50} она имеет более значительный разброс значений d_{50} и d_{90} . Для точки №27 при $d_{50} = 0,158$ имеем $d_{90}/d_{50} = 1,513$, а для точки №8 при $d_{50} = 0,160$ имеем $d_{90}/d_{50} = 2,031$.

Значения глубины и скорости течения, необходимые для расчета расхода наносов по формулам (2.4) – (2.7), были взяты по данным натурных измерений, выполненных в 2017 и 2020 гг. в ближайшей окрестности некоторых точек отбора проб наносов [2, 14]. Эти значения совместно с данными, характеризующими общие гидрологические условия в момент их измерений, представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Глубины воды и скорости течения в окрестности точек отбора проб русловых наносов по данным натурных измерений

№ п/п	Глубина воды, м (h)	Средняя по глубине скорость течения, м/с (U)	Точка отбора проб №	Дата измерений скорости и глубины потока	Расход воды на участке измерений, м ³ /с	Уровень воды на гидропосту Барнаул, м усл. [8]
1	1,37	0,60	19	22.06.2020	1957	2,30
2	1,75	0,71	9	19.05.2020	2973	3,79
3	2,20	0,43	20	19.05.2020	2973	3,79
4	2,40	0,50	27	22.06.2020	1957	2,30
5	2,65	0,84	19	19.05.2020	2973	3,79
6	3,35	0,96	20	23.05.2017	4380	5,44
7	3,54	1,00	9	23.05.2017	4380	5,44
8	4,08	1,04	19	23.05.2017	4380	5,44
9	4,41	1,00	5	22.07.2017	2040	2,67
10	5,13	0,93	27	23.05.2017	4380	5,44
11	7,22	1,00	7	22.07.2017	2040	2,67
12	8,07	1,04	5	24.05.2017	4285	5,47
13	8,28	1,28	7	24.05.2017	4285	5,47

Подчеркнем, что, подбирая информацию для таблицы 2.3, мы стремились, прежде всего, отразить возможные вариации значений глубин и скоростей потока, имеющих место на рассматриваемом участке реки в различных гидрологических условиях. Пространственная привязка к точкам отбора проб была принята для того, чтобы сократить объем рассматриваемых данных. Несмотря на ограниченность выборки, она, по нашему мнению, перекрывает достаточно большой диапазон изменения глубин (1,37 – 8,28 м) и скоростей (0,43 – 1,28 м/с). В таблице 2.3 присутствуют как относительно высокие скорости течения при малых глубинах, так и, наоборот, относительно низкие скорости при сравнительно большой глубине.

Большие значения глубины потока в период половодья около точек отбора №№ 5 и 7 не должны смущать, поскольку, как показано в разделе 1, с 2017 г. по 2021 г. на этом участке произошли существенные изменения рельефа русла. Следует также обратить внимание на относительно высокие скорости потока, даже при сравнительно малых глубинах, в окрестности точки №19, имеющей наибольшую крупность наносов (максимальное значение d_{50}).

Как уже говорилось выше, в рассматриваемых формулах расход наносов существенно зависит от величины критической («неразмывающей») скорости потока. При скорости течения меньше или равной критическому значению, расход наносов равен нулю. В свою очередь, критическая скорость, как видно из формул (2.5) и (2.7), зависит от глубины потока и характеристик крупности наносов (d_{50} , d_{90}).

Рассмотрим насколько чувствительно значение критической скорости к вариациям характеристик крупности наносов. На рисунке 2.9 представлены результаты расчетов значений критической скорости потока по формулам (2.5) и (2.7) в интервале глубин потока, включающем в себя данные таблицы 2.3, для трех вариантов характеристик крупности наносов, представленных в таблице 2.2.

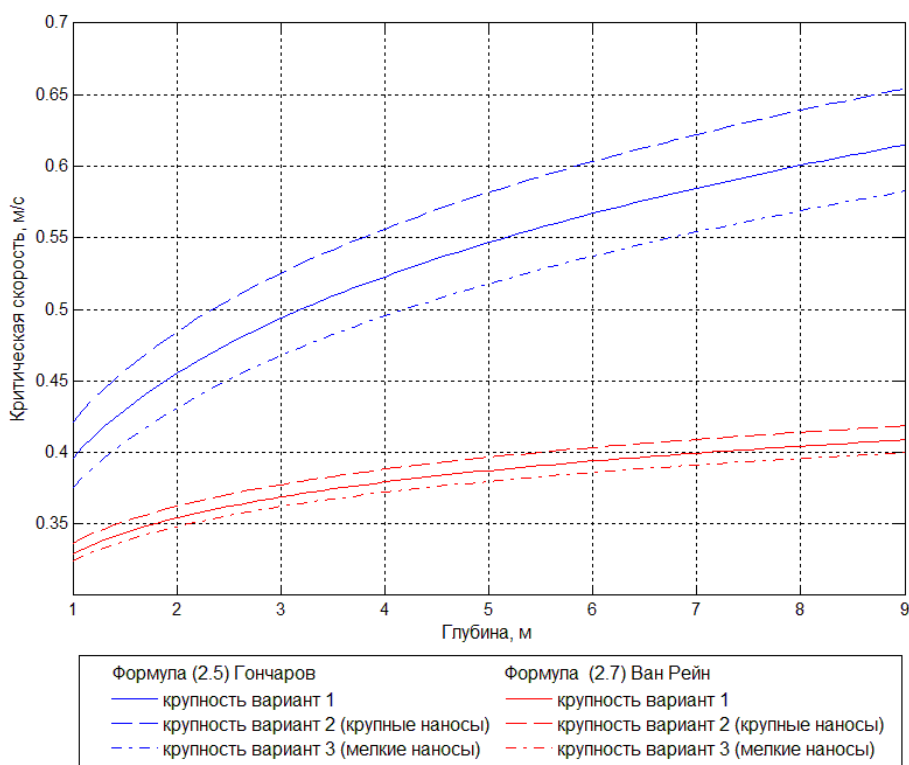


Рисунок 2.9 – Критическая скорость потока по формулам (2.5) и (2.7) для вариантов крупности наносов из таблицы 2.2 в интервале глубин 1 – 9 м

Как видно из рисунка 2.9, в обеих рассматриваемых зависимостях (2.5) и (2.7) критическая скорость увеличивается с ростом глубины и крупности наносов. Вместе с тем

формула Гончарова (2.5) более чувствительна к вариациям в крупности наносов, чем соответствующая формула Ван Рейна (2.7). Однако гораздо более важен тот факт, что значения скорости, вычисленные по данным формулам при одних и тех же характеристиках крупности наносов, различаются в 1,3 – 1,5 раза, что значительно превосходит разброс, обусловленный изменениями этих характеристик, причем формула Гончарова стабильно дает более высокие величины критической скорости, чем формула Ван Рейна.

Безусловно, эти различия должны проявиться и при вычислении значений расхода наносов по формулам (2.4) и (2.6). Результаты таких расчетов для гидродинамических ситуаций (значений глубин и скоростей течения), описанных в таблице 2.3, и вариантов характеристик крупности русловых наносов из таблицы 2.2 приведены в таблице 2.4. Отметим, что в данной таблице, чтобы избежать слишком малых величин, значение расхода наносов дается в час ($\text{м}^3/(\text{час}\cdot\text{м})$), а не в секунду, т.е. результат вычислений по формулам (2.4) и (2.6) умножался на 3600.

Таблица 2.4 – Расход наносов, вычисленный по формулам (2.4) и (2.6) для гидродинамических ситуаций из таблицы 2.3 и вариантов крупности наносов из таблицы 2.2

№ п/п	Глубина воды, м (h)	Скорость течения, м/с (U)	Расход влекомых наносов через поперечное сечение единичной длины в час, $\text{м}^3/(\text{час}\cdot\text{м})$					
			Формула Гришанина (2.4)			Формула Ван Рейна (2.6)		
			Наносы (d_{50}, d_{90}) Вариант 1	Наносы (d_{50}, d_{90}) Вариант 2	Наносы (d_{50}, d_{90}) Вариант 3	Наносы (d_{50}, d_{90}) Вариант 1	Наносы (d_{50}, d_{90}) Вариант 2	Наносы (d_{50}, d_{90}) Вариант 3
1	1,37	0,60	0,007322	0,006891	0,005847	0,014103	0,013102	0,014807
2	1,75	0,71	0,015702	0,015569	0,012123	0,035004	0,033146	0,036359
3	2,20	0,43	0	0	0	0,000429	0,00032	0,000522
4	2,40	0,50	0,000475	0	0,000637	0,002358	0,002029	0,002622
5	2,65	0,84	0,027235	0,027617	0,020704	0,074042	0,070890	0,076491
6	3,35	0,96	0,044866	0,046243	0,033714	0,133852	0,129091	0,137664
7	3,54	1,00	0,052766	0,054635	0,039519	0,160298	0,154903	0,164644
8	4,08	1,04	0,057325	0,059446	0,042885	0,184579	0,178593	0,18949
9	4,41	1,00	0,044084	0,045331	0,033181	0,148761	0,143558	0,153077
10	5,13	0,93	0,026392	0,026573	0,020163	0,098149	0,094176	0,101517
11	7,22	1,00	0,028915	0,029144	0,022075	0,125625	0,120844	0,12983
12	8,07	1,04	0,032402	0,032789	0,024668	0,146956	0,141612	0,151706
13	8,28	1,28	0,091632	0,095826	0,068127	0,387282	0,376991	0,396403

Как видно из таблицы 2.4 в формуле Ван Рейна с уменьшением крупности наносов значение их расхода возрастает, что на наш взгляд, является физически оправданным. Чем мельче материал, тем в больших количествах он будет перемещаться при одинаковых гидродинамических условиях. В формуле Гришанина наблюдается обратная зависимость.

Что касается чувствительности значения расхода наносов к вариациям характеристик их крупности, то для рассмотренных ситуаций в обеих формулах она оказалась примерно одинаковой. Если для заданных величин глубины и скорости потока принять за основу значение расхода наносов, найденное для варианта 1, то значения для других вариантов крупности будут отличаться от него в формуле Гришанина на 1 – 34%, а в формуле Ван Рейна на 2 – 25%.

Наибольшие различия в результатах расчетов закономерно наблюдаются между самими формулами. Формула Ван Рейна (2.6) для рассмотренных гидродинамических ситуаций дает значение расхода наносов в 1,9 – 5,8 раз превышающее величину, полученную по формуле Гришанина (2.4). Впрочем, этот факт не является неожиданностью. Хорошо известно, что результаты расчета расхода наносов по различным формулам могут различаться на порядок и более при одних и тех же исходных данных [9, 11, 15]. В данном случае различия получились менее значительными (не в десять, а в шесть раз), вероятно, потому, что рассмотренные формулы имеют сходную общую структуру и одинаковый набор параметров.

Для того чтобы сделать отмеченные выше различия более наглядными, результаты расчетов расхода наносов по формулам Ван Рейна (2.6) и Гришанина (2.4) из таблицы 2.4 представлены в графическом виде на рисунке 2.10. Отметим, что поскольку значения глубины воды уникальны, установить соответствие между таблицей и рисунком достаточно просто.

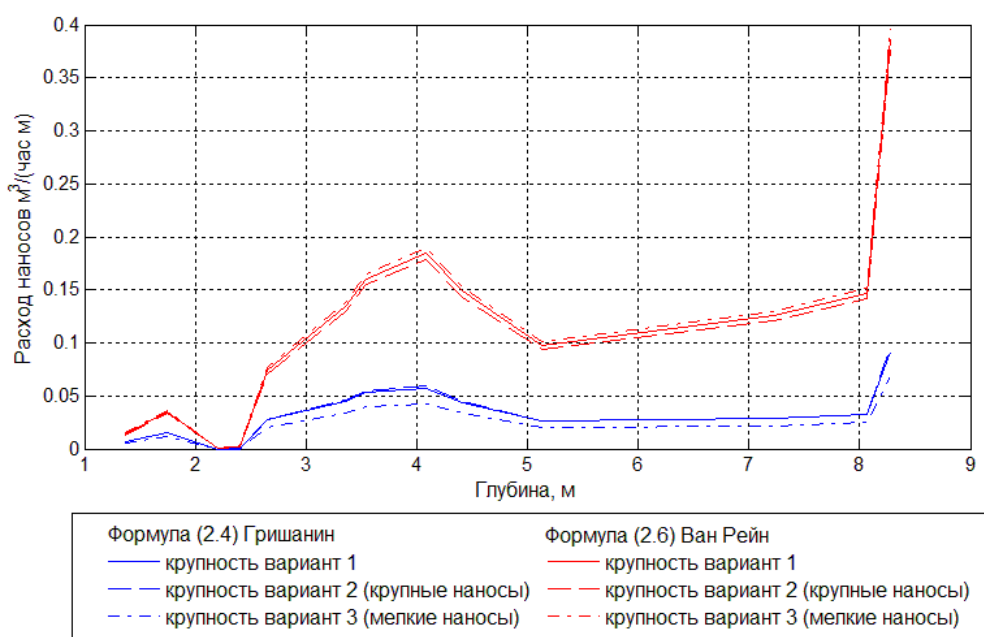


Рисунок 2.10 – Результаты расчета расхода наносов по формулам Гришанина и Ван Рейна из таблицы 2.4

Разумеется, выполненная работа не свободна от недостатков, которые в основном объясняются ограниченностью имевшихся в нашем распоряжении ресурсов и времени.

Натурные данные охватывали лишь поверхностный слой наносов и только в надводной части русла. Примитивные средства гранулометрического анализа (ограниченный набор сит, ручное просеивание, сравнительно высокая погрешность весов) обусловили достаточно грубое построение эмпирических кривых распределения.

Также следовало бы расширить сравнительный анализ результатов расчета расхода наносов по различным зависимостям, как за счет включения в него других формул, так и за счет расширения набора рассматриваемых реальных гидродинамических ситуаций.

Тем не менее, результаты проведенных исследований позволяют, по нашему мнению, сделать следующие выводы.

1. Несмотря на локальные вариации, в целом для протяженного участка русла характеристики крупности наносов достаточно однородны.

2. Русловые наносы р. Обь на территории г. Барнаула представлены песком средней крупности с медианным диаметром около 0,26 мм.

3. Практически неизбежные неточности и\или неопределенности в оценке характеристик крупности русловых наносов оказывают на результаты расчета их расхода существенно меньшее влияние, чем выбор собственно расчетной формулы.

Формула для определения расхода наносов является важнейшим элементом компьютерной морфодинамической модели руслового потока. Как было показано ранее, использование неадекватной формулы может привести к тому, что результаты расчетов русловых деформаций не будут соответствовать действительности [16].

Из двух рассмотренных выше формул для определения расхода песчаных влекомых наносов (Гришанина и Ван Рейна) формула Ван Рейна представляется нам более предпочтительной для использования в морфодинамической модели русла р. Обь на территории г. Барнаула.

3. Компьютерное моделирование морфодинамики русла р. Обь в районе Барнаульского водозабора №2

Задачей данного этапа работ по Проекту является построение компьютерной модели морфодинамики русла р. Обь в районе Барнаульского водозабора №2, которая бы адекватно описывала вертикальные и плановые деформации русла на данном участке.

Постановка такой задачи обусловлена, во-первых, важностью данного участка в хозяйственном отношении, и, во-вторых, устойчиво негативной тенденцией в развитии руслового процесса в его пределах. Подробная характеристика современной морфодинамики русла реки на рассматриваемом участке приведена в разделе 1 настоящего отчета. Создание компьютерной модели позволило бы проводить численное изучение и оценку различных вариантов инженерных мероприятий, направленных на противодействие негативному развитию руслового процесса на этом критически важном участке реки.

На первом этапе работ по Проекту морфодинамика русла реки на рассматриваемом участке уже моделировалась в рамках более протяженной области [1]. Однако тогда особого внимания именно этому участку, как в построении модели, так и в оценке результатов расчетов, не уделялось. Кроме того, повторное обращение к задаче моделирования данного участка позволяет учесть опыт таких работ, накопленный на предыдущих этапах Проекта [1, 2], а также новые натурные данные по объекту.

Вообще говоря, компьютерная модель морфодинамики русла включает в себя следующие основные компоненты:

- математическая модель, то есть система определяющих уравнений, описывающих гидродинамику речного потока, транспорт наносов и русловые деформации;
- цифровая модель рельефа (ЦМР) русла и побережья (поймы) в расчетной области;
- расчетная сетка, на которой численно решается система уравнений математической модели;
- начальные и граничные условия, которые задают исходные значения характеристик руслового потока и описывают их изменения на границах расчетной области за весь расчетный период времени;
- набор значений ряда физических и вычислительных параметров;
- программное средство, с помощью которого выполняется расчет.

Применяемая для решения поставленной задачи математическая модель гидродинамики и морфодинамики руслового потока была разработана на предыдущих этапах работ по Проекту, и, подробно изложена в [2]. Исходя из полученного тогда опыта

моделирования транспорта наносов и русловых деформаций [1, 2, 16, 17], а также с учетом соображений, изложенных в разделе 2 настоящего отчета, для расчета расхода наносов приняты формулы Ван-Рейна (*Van Rijn*) 1984 года [12].

Проблема формулирования граничных условий является, по-видимому, самым сложным пунктом при построении компьютерной модели. С одной стороны, границы расчетной области (входной и выходной створы) должны располагаться на достаточном удалении от той области, которая является основным объектом моделирования, чтобы исключить влияние на результат неизбежных неточностей в их задании. С другой стороны, если речь идет о моделировании реальной русловой ситуации, в этих граничных створах должны иметься соответствующие данные, характеризующие русловой поток. Наконец, общие размеры расчетной области, ограниченной данными створами, существенно влияют на необходимые для моделирования вычислительные ресурсы и время расчета.

В принятой математической модели гидродинамики руслового потока во входном створе должны задаваться расходы воды, а в выходном створе – соответствующие эти расходам значения уровня воды, обе характеристики как функции времени [2].

В 2021 г. детальные наблюдения за параметрами речного потока (уровнями и расходами воды), аналогичные работам второго этапа на участке у водозабора №1 [2], по ряду не зависящих от исполнителей причин организационно-финансового порядка на рассматриваемом участке не проводились.

Однако по итогам наблюдений 2020 г. имеются взаимосогласованные данные об уровнях и расходах воды для створа, расположенного в 3 км ниже водозабора №2 (рисунок 3.1). Этот створ и был принят в качестве нижней (выходной) границы области моделирования.

Существенным недостатком этих данных является то, что они относятся только к периоду спада половодья и перехода к осенней межени (май – октябрь). Разумеется, в створе гидрологического поста Барнаул полный набор данных для всего периода открытой воды имеется (рисунок 1.5). Однако в этом случае пришлось бы увеличить протяженность области моделирования еще на 8 километров и озаботиться сбором актуальной информации о рельефе русла на этом дополнительном участке.

Верхний (входной) створ области моделирования, как и на первом этапе работ, располагался выше водозабора №2 на коротком прямолинейном участке русла в месте сопряжения двух свободных излучин (рисунок 3.1).

Общая протяженность области моделирования по геометрической оси русла составляет 9,6 километра.



Подложка – космический снимок спутника Ресурс-П, дата съемки 30 сентября 2018 г.

Рисунок 3.1 – Границы области компьютерного моделирования морфодинамики русла р. Обь в районе Барнаульского водозабора №2

Данные о расходах и уровнях воды в русле реки за 2020 г. на вышеупомянутом пункте наблюдений представлены на рисунке 3.2.

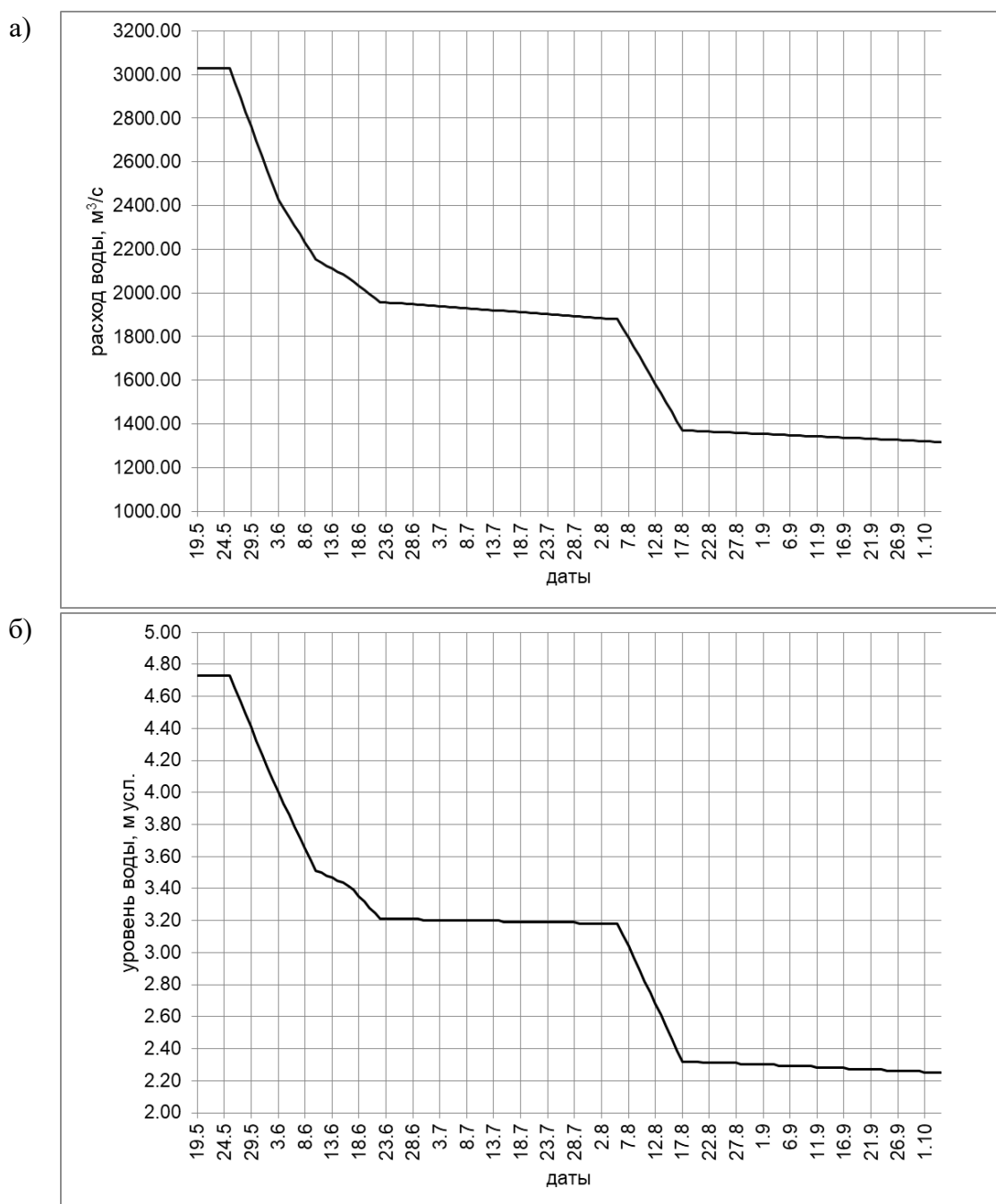


Рисунок 3.2 – Расходы (а) и уровни воды (б) р. Обь в створе пункта натуральных наблюдений (рисунок 3.1) за период 19 мая – 04 октября 2020 г.

Как видно из рисунка 3.2я. расход воды основного русла реки в фазу спада половодья и перехода к межени изменялся в 2020 г. от 3030 до 1317 м³/с. Результаты наших многолетних наблюдений показывают, что при таких значениях расходов воды пойменный массив на рассматриваемом участке не затапливается [1,2, 14, 18].

Расходы воды в протоках, пролегающих по пойменному массиву, в частности, правобережной Ереснинской протоки между водозаборами, составляют в сумме не более

2% от расходов воды основного русла реки [2, 18]. Следовательно, допустимо относить измеренные в выходном створе расходы воды и к входному створу компьютерной модели. Таким образом, данные, приведенные на рисунке 3.2, вполне определяют гидродинамические граничные условия потока.

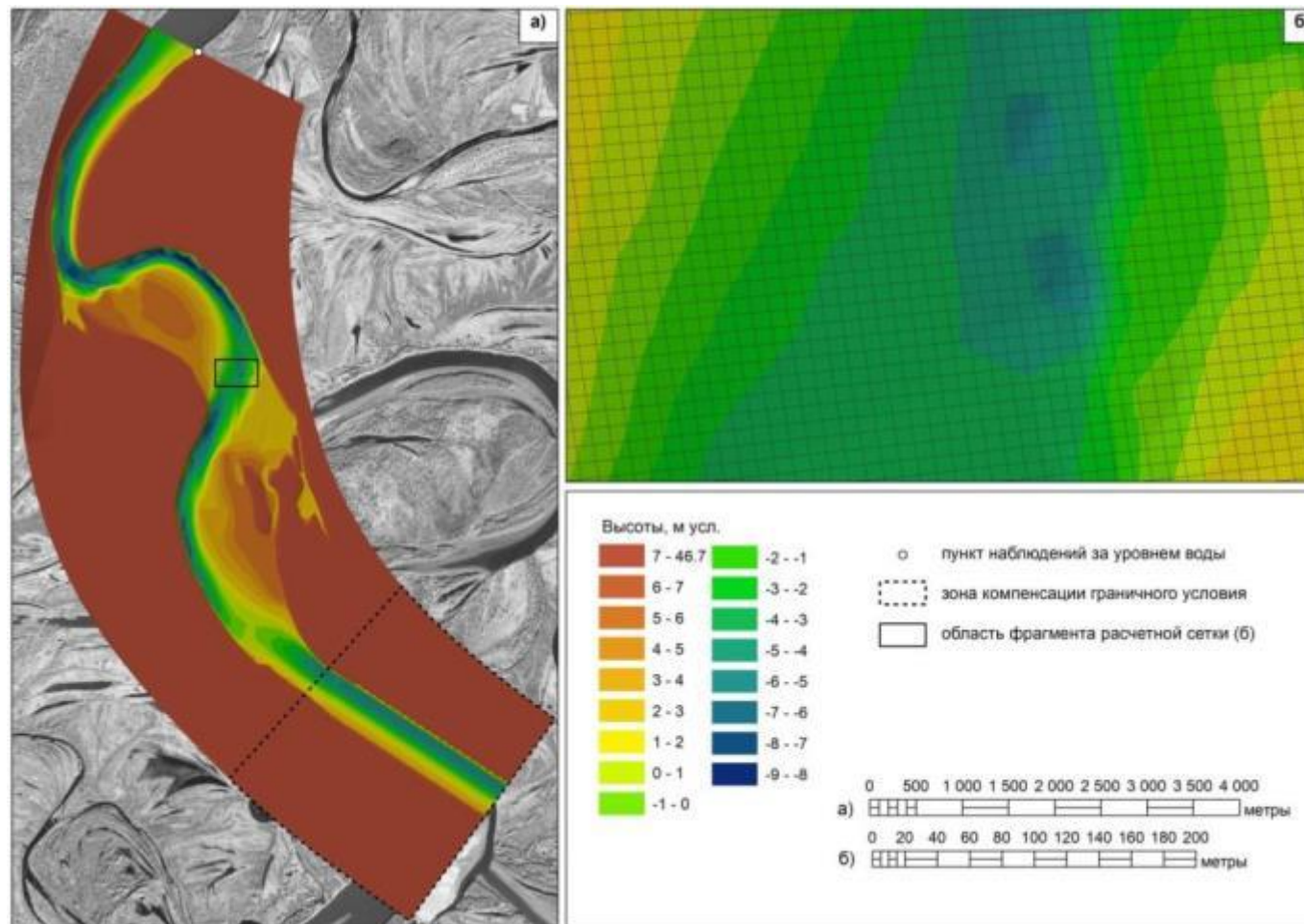
Следует отметить, что факт незатопления поймы при выбранных для моделирования гидрологических условиях существенно упрощает задачу построения цифровой модели рельефа в расчетной области. К сожалению, детальная информация о рельефе пойменного массива нам недоступна, а работа по получению таких данных исключительно собственными силами выходит далеко за рамки данного Проекта.

Итак, стремясь к моделированию реальной или максимально близкой к реальной русловой ситуации на рассматриваемом участке, мы остановились на данном сценарии гидрологических условий в силу а) наличия соответствующих натуральных данных о параметрах потока и б) отсутствия информации, адекватно описывающей рельеф пойменного массива.

В 2020 г. гидрографические работы на рассматриваемом участке нами не проводились, а промеры глубин, выполненные в 2021 г., не покрывают его полностью (рисунок 1.4). Поэтому для компьютерной модели была использована цифровая модель рельефа русла, созданная на первом этапе работ по Проекту [1]. В отношении рассматриваемого участка она базируется на данных русловых съемок, выполненных нами в 2017 г. (рисунок 3.3а). Разумеется, эта модель отличается от реального рельефа русла на участке, как в 2020-том (по которому строился гидрологический сценарий), так и в 2021 году. Тем не менее, сравнив её с современной ситуацией (рисунок 1.4в), можно сказать, что принятая цифровая модель, не претендуя на абсолютную точность и актуальность, отражает основные черты морфологии русла.

Следует также отметить, что промеры глубин, на основе которых строилась цифровая модель русла, выполнялись при высокой воде (в мае – июне). То есть она отражает состояние рельефа русла именно в период пика половодья и начала его спада, и, в этом отношении, согласуется с принятым гидрологическим сценарием.

Поскольку гидрологические условия моделирования не предполагают выход речного потока из берегов, рельеф пойменного массива отражен в модели весьма схематично. Прилегающая к руслу по обоим его берегам территория моделируется двумя плоскостями, которые постепенно понижаются вниз по течению и имеют малый наклон от боковой границы области к бровке берега [1]. Пойменные протоки и старицы искусственно перекрыты. Высотные отметки бровки берега, в тех местах, где они не были известны, принимались на три метра выше меженного уровня воды в данном месте.



Подложка – космический снимок спутника Ресурс-П,
дата съемки 30 сентября 2018 г.

Рисунок 3.3 – Визуализация цифровой модели рельефа (а) и фрагмент расчетной сетки (б) для компьютерного моделирования морфодинамики русла р. Обь в районе водозабора №2

Как уже говорилось выше, во входном створе задается общее значение расхода воды. При этом скорость течения в каждой расчетной ячейке створа определяется путем распределения заданного расхода пропорционально элементарным (в пределах ячейки) площадям живого сечения потока. Разумеется, такое распределение может и не соответствовать реальным условиям.

Кроме того, в морфодинамической модели русла во входном створе также должен быть определен расход наносов. Измерить в натуральных условиях полный расход наносов (взвешенных и влекомых) практически невозможно. Лишь в некоторых ситуациях он точно известен. Например, в нижнем бьефе гидроузла его можно полагать равным нулю, поскольку наносы перехватываются в верхнем бьефе и на плотине. В остальных случаях приходится предполагать, что во входном створе русловой поток является полностью насыщенным наносами, т.е. переносит их столько, сколько может физически транспортировать в данных гидродинамических условиях.

Чтобы устранить влияние этих предположений в описании граничных условий на результаты расчетов, входной створ модели был сдвинут вверх по течению на два километра. Цифровая модель рельефа русла в этой искусственной зоне компенсации строилась путем клонирования рельефа входного створа с постепенным повышением отметок дна из расчета 5 сантиметров на километр (рисунок 3.3а).

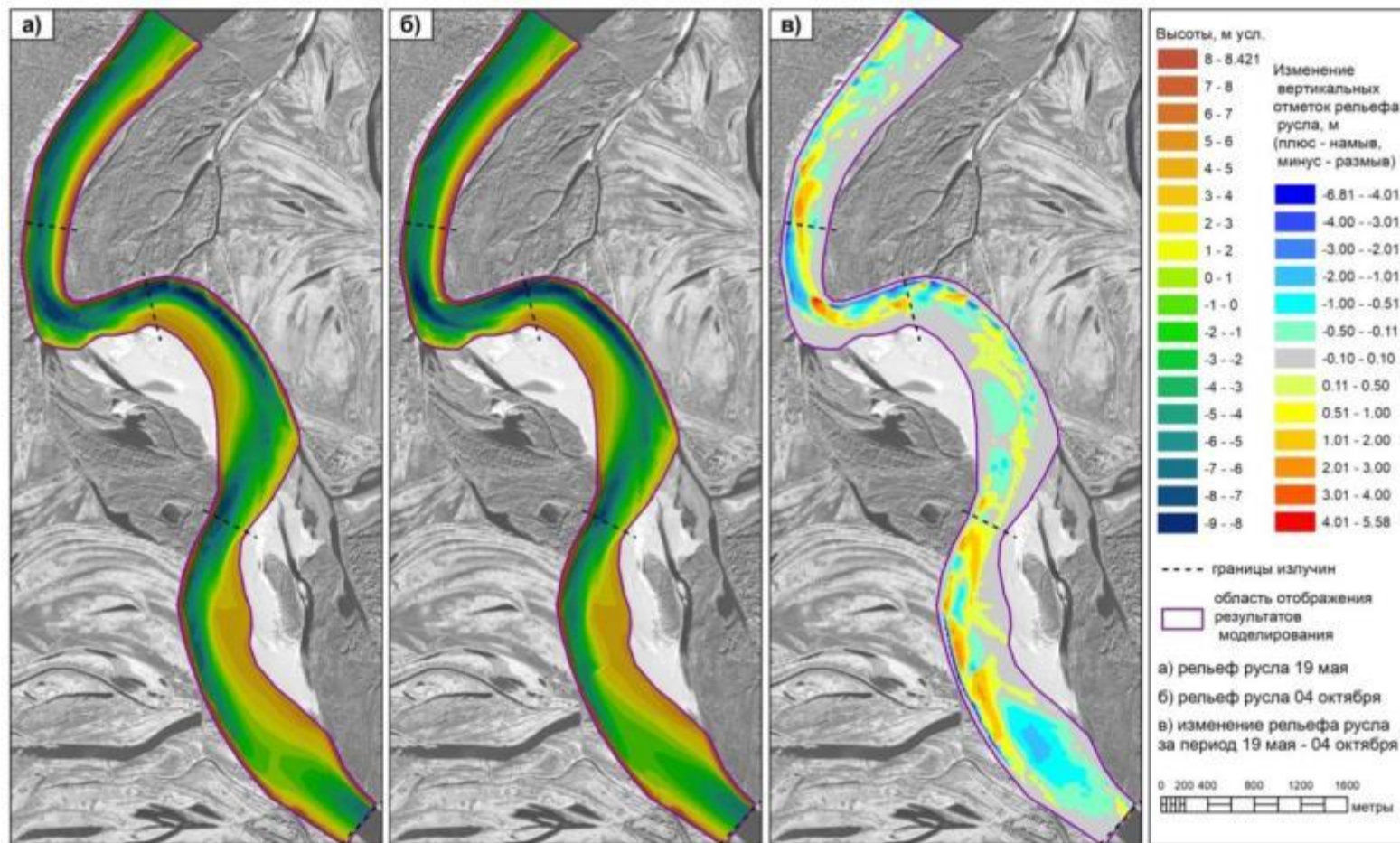
С учетом опыта предыдущих этапов задача решалась в трехмерной (3D) постановке. Расчеты выполнялись на регулярной пространственной сетке $774 \times 274 \times 5$, построенной с учетом цифровой модели рельефа исследуемой области, со средними размерами ячейки в плане 10 на 10 метров (рисунок 3.3б).

Моделирование выполнялось с применением специальной версии пакета с открытым исходным кодом Delft3D [19].

Общая продолжительность моделируемого периода – 139 дней. Шаг по времени равен 6 с. Продолжительность расчета – 258 часов.

Исходя из цели проекта и выбранного объекта исследования, основное внимание при изучении и оценки полученных результатов моделирования будет обращено на вертикальные и плановые деформации русла в вынужденной излучине и прилегающей к ней свободной излучине в окрестности водозабора №2 (рисунок 1.1).

На рисунке 3.4 представлены исходный и конечный вид рельефа русла на рассматриваемом участке, а также картина его изменений за моделируемый период. Укажем, что на рисунке отображена лишь та область, которая подвергалась воздействию речного потока; пассивные, т.е. фактически не вовлеченные в расчет ячейки сетки, не показаны.

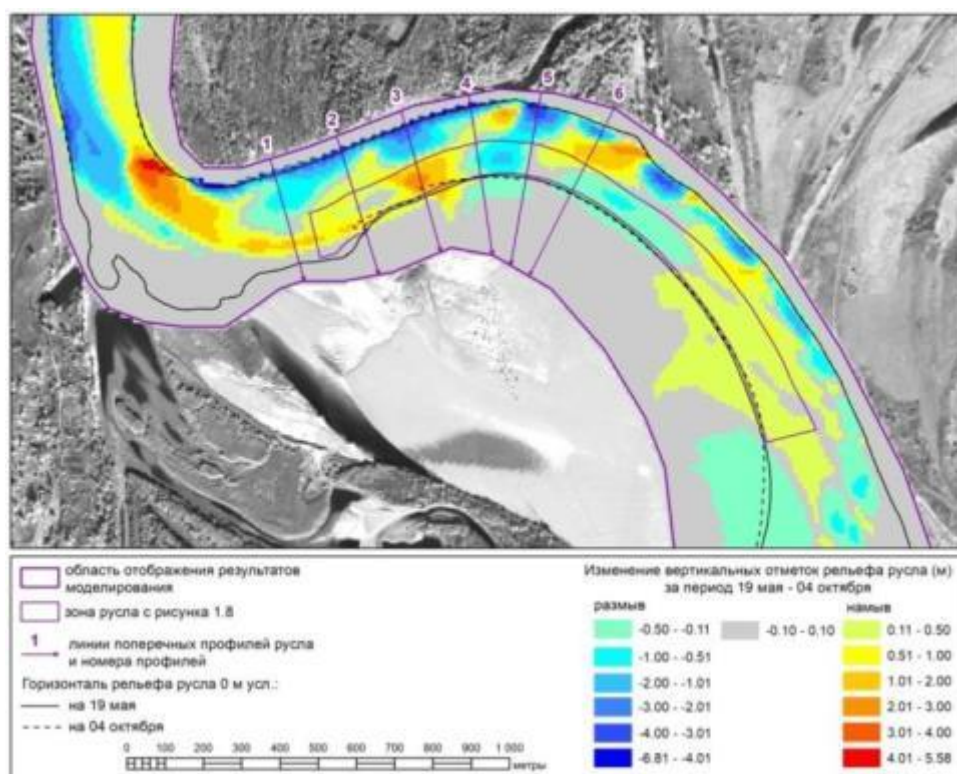


Подложка – космический снимок спутника Ресурс-П, дата съемки 30 сентября 2018 г.

Рисунок 3.4 – Результаты компьютерного моделирования морфодинамики русла р. Обь в районе водозабора №2: исходный рельеф русла (а); рельеф русла в конце моделируемого периода (б); изменение рельефа русла за период моделирования (в)

Прежде всего, следует отметить, что по результатам моделирования рельеф русла на рассматриваемом участке не претерпел существенных изменений. В нём сохранились все основные морфологические элементы (плёсовые ложбины, перекаты, побочни), которые и в натуральных условиях, как было показано в разделе 1, являются образованиями устойчивыми. Этот факт свидетельствует в пользу разработанной модели. На предыдущих этапах работы было продемонстрировано, что некорректно построенная модель может давать картину русловых деформаций, кардинально меняющую рельеф и плановые очертания русла и противоречащую основным закономерностям руслового процесса на моделируемом участке [1].

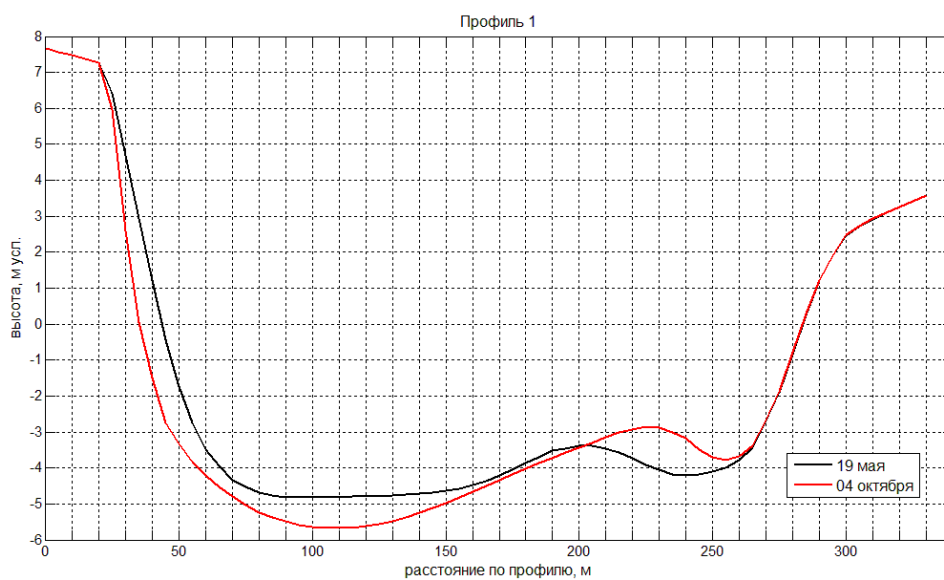
Во-вторых, укажем на значительный размыв русла у правого берега в смежных крыльях вынужденной и свободной излучин. Рассмотрим этот участок более подробно в свете имеющихся натуральных данных. Рисунок 3.5 воспроизводит для него в укрупненном и детализированном виде картину итоговых деформаций, представленную на рисунке 3.4в. Здесь же обозначены линии, по которым будет оцениваться итоговое изменение поперечного профиля русла. Исходные и конечные профили русла по данным линиям приведены на рисунках 3.6 и 3.7.



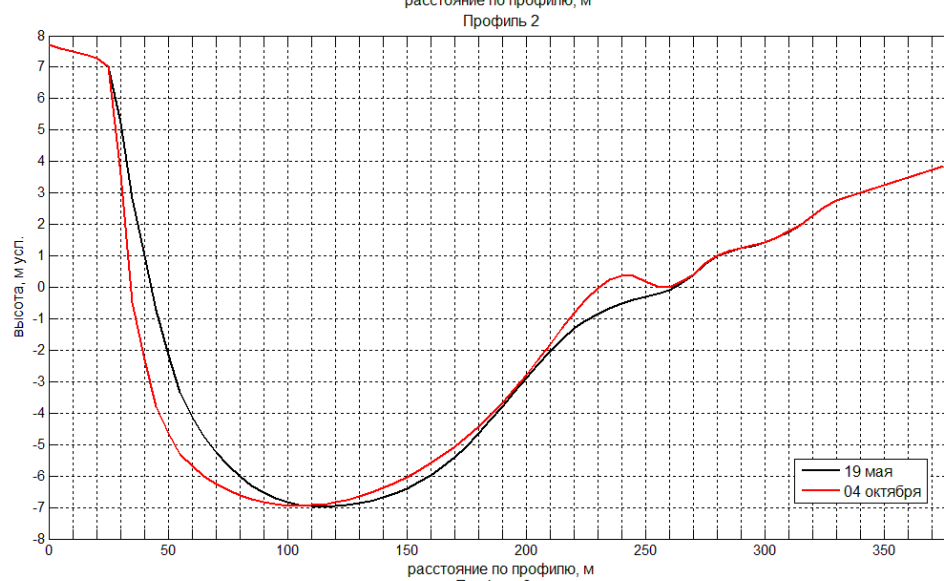
Подложка – космический снимок спутника Ресурс-П, дата съемки 30 сентября 2018 г.

Рисунок 3.5 – Итоговые изменения рельефа русла в окрестности водозабора №2 по результатам моделирования

а)



б)



в)

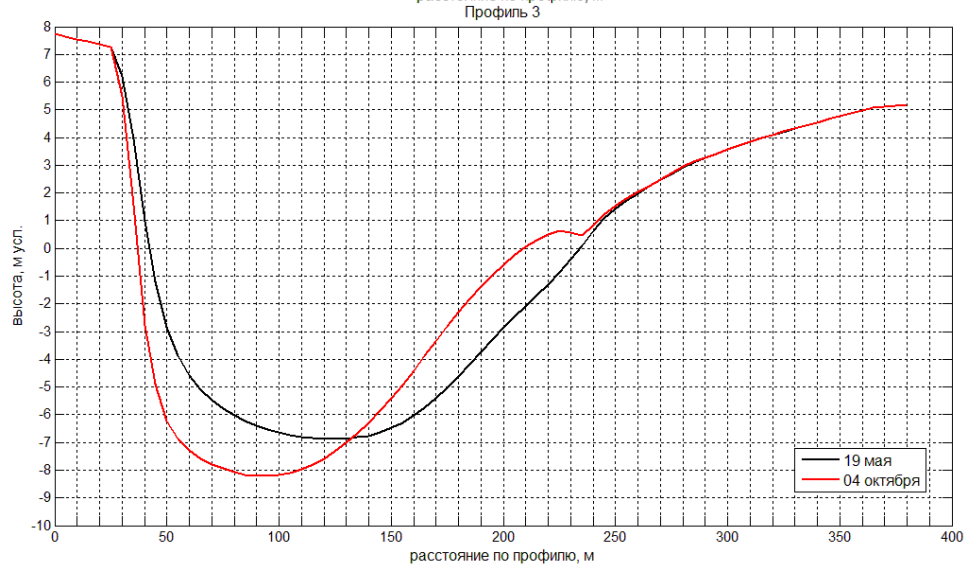
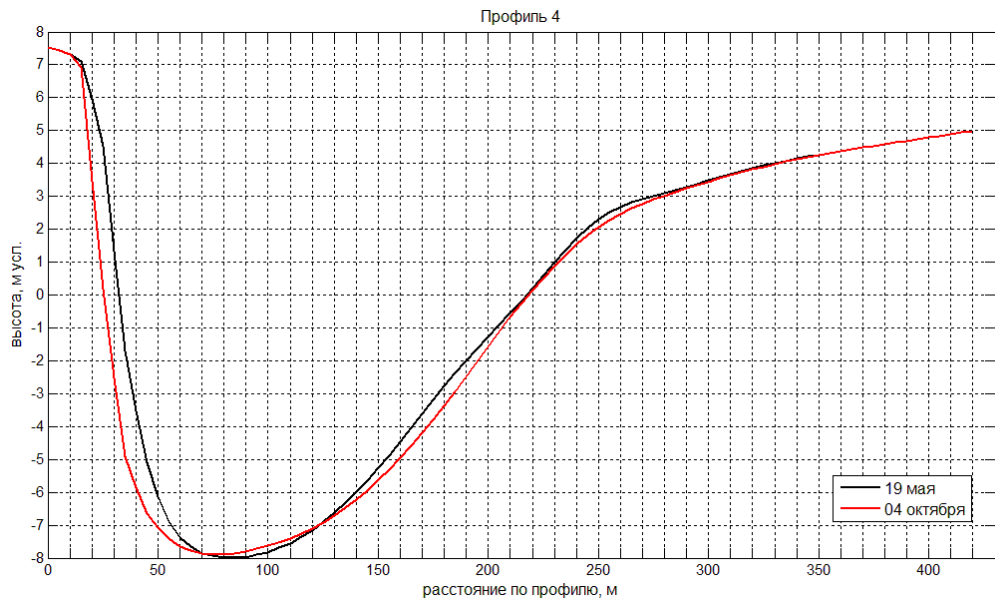
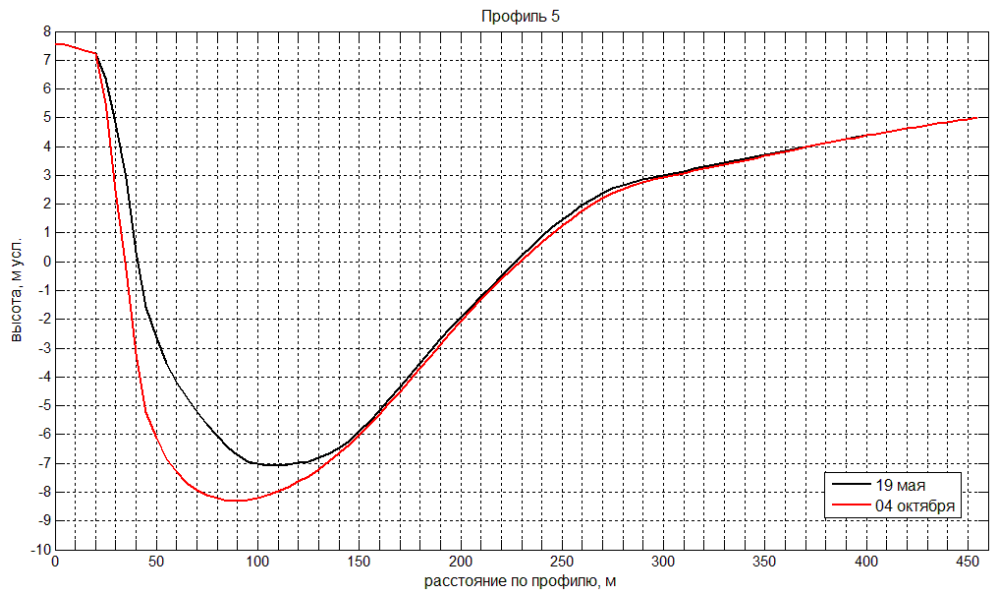


Рисунок 3.6 – Итоговые расчетные изменения рельефа русла по линиям поперечных профилей (рисунок 3.5). Профили №1 - №3

а)



б)



в)

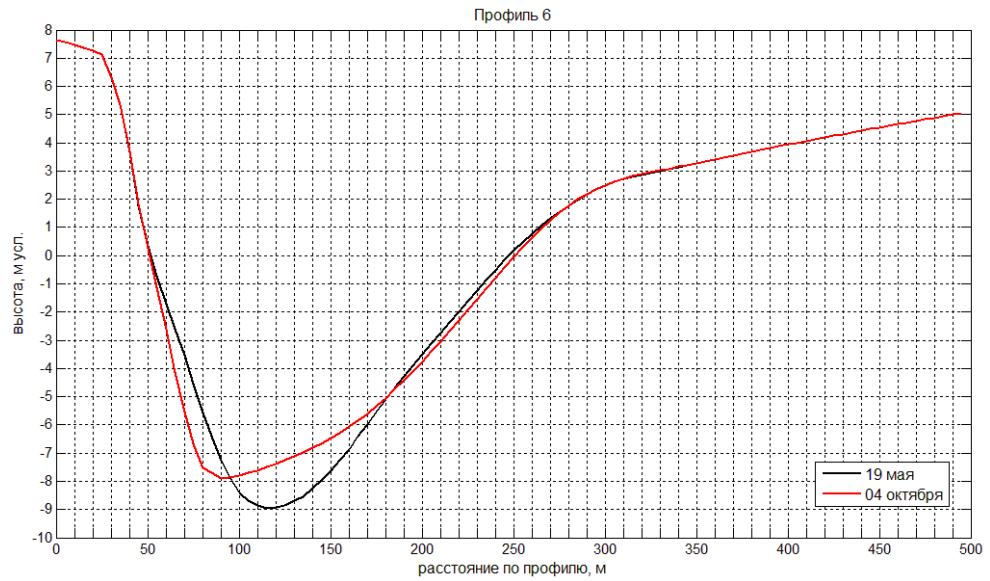


Рисунок 3.7 – Рисунок 3.6 – Итоговые расчетные изменения рельефа русла по линиям поперечных профилей (рисунок 3.5). Профили №4 - №6

Как видно из рисунков 3.6 – 3.7, модель воспроизводит явление размыва и отступления правого берега в смежных крыльях вынужденной и свободной излуцин. Однако, по результатам расчета наибольшее смещение бровки берега наблюдается в верхнем крыле вынужденной излуцины; далее, вверх по течению оно в целом уменьшается, хотя рост крутизны берегового склона проявляется во всех рассмотренных профилях. По горизонтали 4 м усл. смещение берегового склона в сторону суши для профилей №№ 1 – 3 составляет 4 – 5 м, что существенно меньше натуральных значений среднегодовой скорости отступления бровки берега в этом месте (13 – 16 м/год). В верхних створах (№№ 4 – 6) значение отступления берега остается на том же уровне или меньше. Таким образом, при заданном гидрологическом сценарии результаты моделирования не показывают имеющего места в природе эффекта «заваливания» верхнего крыла вынужденной излуцины, т.е. усиленного размыва берега в окрестности створов №№ 4 – 6 (рисунок 1.7, таблица 1.1). Наоборот, в данном случае фокус (максимум) разрушения сдвинут вниз по течению ближе к вершине вынужденной излуцины.

Обратимся теперь к зоне русла, охватывающей часть выпуклого левого берега (рисунок 3.5). По натурным данным в этой зоне наблюдается прогрессирующее накопление наносов (рисунок 1.8). Общий объем аккумуляции за четыре года (2017 - 2021) составил 614 тыс. м³, т.е. 153,5 тыс. м³ в год. Картина расчетных итоговых изменений рельефа в этой зоне несколько отличается от рисунка 1.8. В ней наблюдается не только аккумуляция, но и довольно заметный размыв дна. Тем не менее, как видно из рисунка 3.8, в целом по зоне процесс аккумуляции абсолютно доминирует.

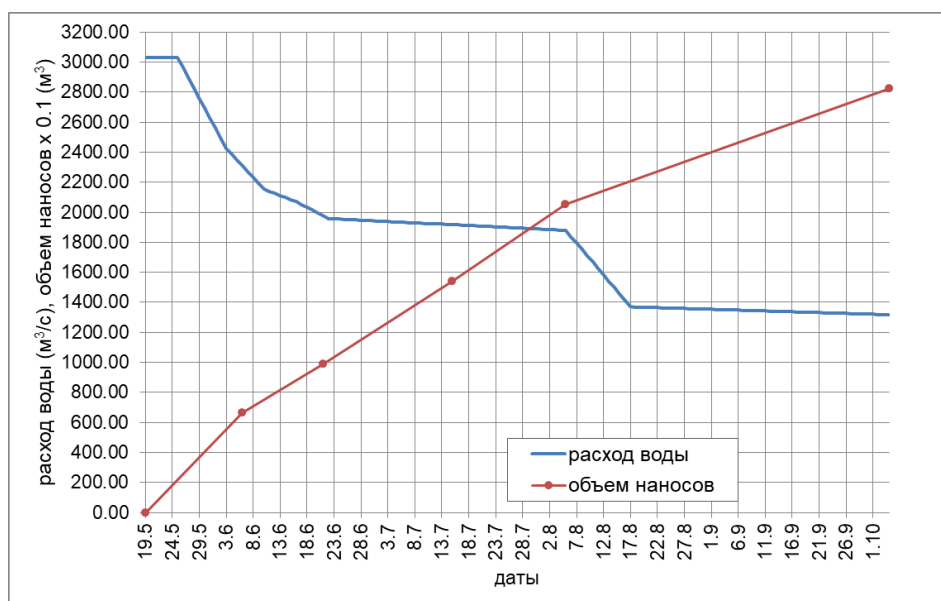


Рисунок 3.8 – Объем наносов, накопленный в левобережной зоне (рисунки 1.8 и 3.5) за период моделирования (19 мая – 04 октября)

За модельный период в рассматриваемой зоне было накоплено 28 тыс. м³ наносов, т.е. значительно меньше натурального среднегодового значения (153,5 тыс. м³).

На рисунке 3.8 также явно видна связь скорости аккумуляции наносов (наклона графика объема наносов) с расходами воды. Интересно также отметить, что в диапазоне расходов воды 2200 – 1800 м³/с скорость накопления наносов постоянна.

Динамика изменения рельефа участка русла в окрестности водозабора №2 (в вынужденной и смежной с ней свободной излучине) за период моделирования представлена на рисунке 3.9.

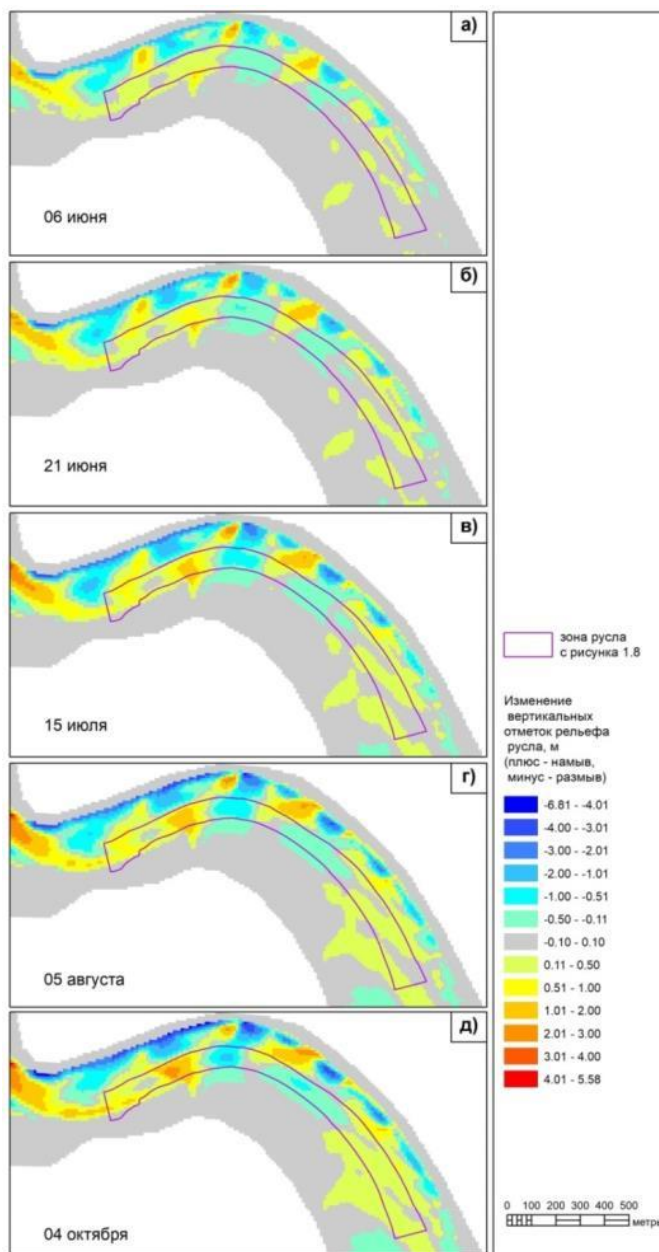


Рисунок 3.9 – Расчетные итоговые изменения рельефа русла в окрестности водозабора №2 с момента начала моделирования (19 мая) по состоянию на 06 июня (а), 21 июня (б), 15 июля (в), 05 августа (г), 04 октября (д)

Из рисунка 3.9 можно заключить, что процесс размыва у правого берега, в смежных крыльях излучин, продолжается в течение всего периода моделирования, несмотря на снижение расхода воды, как и процесс накопления наносов в противоположащей левобережной зоне (рисунок 3.8). В центральной части этой зоны (в вершине изгиба её формы в плане) также происходит процесс постоянного размыва дна, а общий положительный баланс наносов обеспечивается их накоплением на периферийных участках зоны (крыльях изгиба). Также рисунок 3.9 хорошо демонстрирует процесс постоянного притока наносов с вышележащего участка реки в верхнюю (по течению) часть рассматриваемой зоны.

Наконец, следует отметить, что в свободной излучине, расположенной в начале участка, наибольший размыв вогнутого левого берега наблюдается в её вершине и верхнем крыле (рисунок 3.4в), а не в нижнем крыле, как о том говорят натурные данные (рисунок 1.9в).

Как нам представляется, указанные выше отличия результатов расчета от натурных данных обусловлены, главным образом, выбранным гидрологическим сценарием моделирования (рисунок 3.2). В нем полностью отсутствует фаза нарастания и пика половодья, а расход воды не превышает уровня $3000 \text{ м}^3/\text{с}$. Среднегодовое натурные данные по скорости отступления берега и объемам накопления наносов эту фазу, безусловно, учитывают. Как показывают наши наблюдения 2017 – 2020 годов, даже при не очень мощном в многолетнем плане половодье, при практически незатопленной пойме расход воды в основном русле реки в период его пика может достигать $4500 \text{ м}^3/\text{с}$ [1, 2, 14]. По нашему мнению, при включении этой фазы в сценарий моделирования и существенном увеличении значений расхода воды в период максимума половодья (на $1000 - 1500 \text{ м}^3/\text{с}$) итоговые результаты расчета русловых деформаций будут лучше соответствовать натурным данным, как по порядку величин, так и по локализации в пространстве. Об этом же свидетельствуют результаты моделирования, выполненного на первом этапе работ (рисунок 6.3 в [1]).

Вместе с тем, полученные расчетные значения отступления бровки берега и объема накопленных наносов при данном гидрологическом сценарии (т.е. для периода спада половодья и перехода к межени) можно считать вполне реалистичными.

Маловероятно, что спрямление вынужденной излучины у водозабора №2 произойдет в ближайшие несколько лет. Как показывают материалы, приведенные в разделе 1, это дело более отдаленной перспективы. Однако, по нашему мнению, уже сегодня следует подумать над теми инженерными мероприятиями, которые могли бы

предотвратить или, хотя бы, существенно отсрочить это катастрофическое, с точки зрения функционирования водозабора, событие.

Покажем каким образом созданная компьютерная модель морфодинамики русла может быть использована в этих целях.

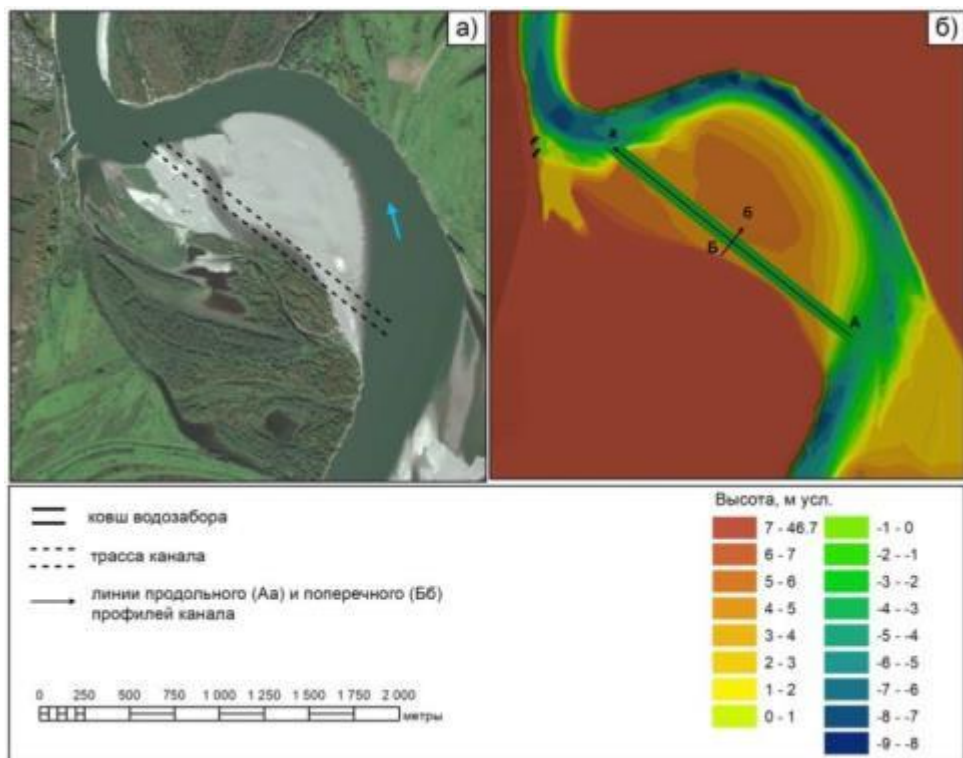
Следует подчеркнуть, что приведенный ниже материал носит исключительно демонстрационный характер. Предпроектная научная разработка вариантов инженерных мероприятий по противодействию негативному ходу руслового процесса есть отдельная масштабная работа, требующая, в частности, подробных инженерных изысканий различного рода (гидрологических, гидрографических, инженерно-геологических и т.п.).

Первым и наиболее очевидным решением проблемы является превращение размываемого берега в заваливающимся крыле излучины в «неразмываемый» путем создания берегозащитного сооружения. Однако, для того, чтобы обеспечить действительную неразрушаемость на очень длительный период, оно должно иметь значительную прочность (высокий класс капитальности). Создание такой конструкции является технически и технологически сложным и весьма дорогостоящим делом [20, 21]. Применение более простых и дешевых каменно-набросных банкетов, обычных для практики берегоукрепления на реках, как показывает опыт подобных работ на участке русла у водозабора №1, не дает нужного эффекта [6].

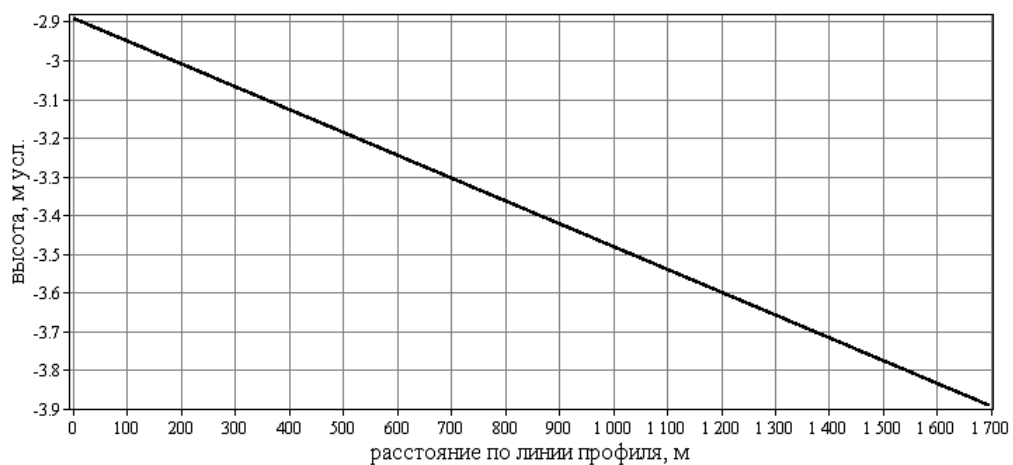
Второй способ подсказывает сама природа. В тыльной части левобережного побочня вдоль бровки берега пойменного массива пролегает ложбина (понижение в рельефе). Эта ложбина существует уже длительное время (рисунок 1.7, рисунок 2.1). Как показывают наши наблюдения, в период половодья по ней осуществляется достаточно активный сток воды со скоростями течения 0,6 – 0,8 м/с [14].

Идея состоит в том, чтоб частично спрямить изгиб русла реки выше водозабора, проложив канал (прорезь) через песчаные отложения левобережного побочня по направлению этой ложбины (рисунок 3.10). Выражаясь в терминах гидроморфологической теории руслового процесса, превратить «свободное меандрирование» в «незавершенное меандрирование» [4].

Следует отметить, что такой способ естественного спрямления системы «свободная излучина» - «вынужденная излучина» в научной литературе по русловедению пока отражения не нашел. Известна лишь одна схема эволюции данной системы, приведенная на рисунке 1.3. Поэтому весьма маловероятно, что в проложенный канал со временем переместится основной поток, а изгиб русла отомрет. Тем не менее, он будет принимать на себя часть расхода воды, тем самым снижая скорости течения в изгибе русла, а значит, уменьшая интенсивность размыва берега.



в)



г)

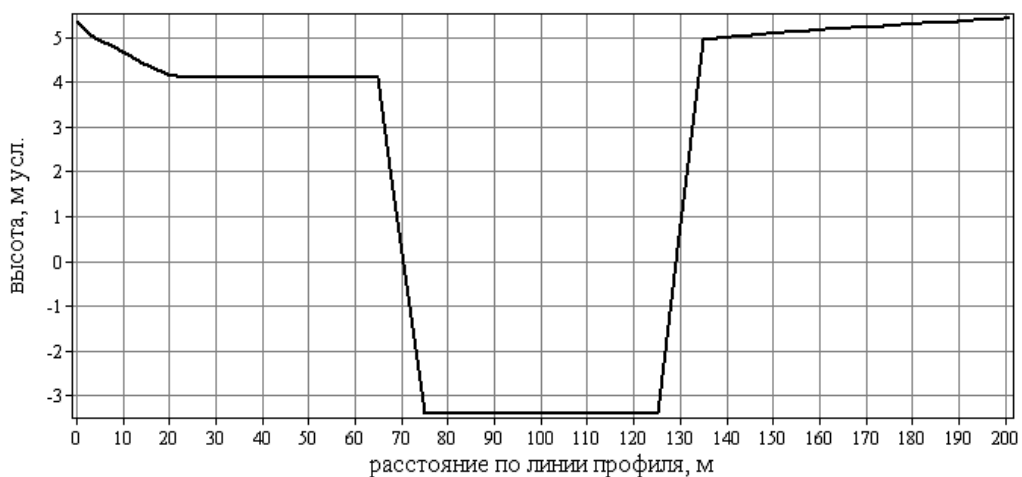


Рисунок 3.10 – Канал, спрямляющий изгиб русла р. Обь у водозабора №2: местоположение канала (а); визуализация цифровой модели рельефа (б); продольный профиль канала по линии Аа (в); поперечный профиль канала по линии Бб (г)

Следует отметить, что, как показывает практика, применение русловыправительных мероприятий для защиты территории от негативного воздействия вод (в том числе и от размыва берегов) существенно дешевле возведения капитальных защитных сооружений [21]. Необходимые для разработки канала технические средства (рефулеры, землечерпальные снаряды, баржи и буксирные суда) имеются в местных органах, ответственных за состояние водного пути, и в Барнаульском речном порту. Кроме того, в процессе строительства канала фактически производится добыча ценного строительного материала – речного песка.

Рассматривается прямолинейный канал постоянного поперечного трапециoidalного сечения. Он берет свое начало у подножия напорного склона переката в свободной излучине и выходит к ложбине русла, расположенной у вершины вынужденной излучины. Длина канала – 1697 м. Ширина по дну – 50 м, ширина по поверхности – 70 м. Глубина, считая от поверхности побочня – 7 м. Площадь поперечного сечения – 420 м². Продольный уклон – 0,59 промилле (59 см /1 км), что примерно в 10 раз больше среднего уклона реки на относительно прямолинейных участках русла р. Обь в районе г. Барнаула.

Прямолинейность и призматичность канала призваны обеспечить условия для относительно равномерного течения в канале, а, следовательно, и для устойчивости его формы. Значительный продольный уклон должен способствовать притоку воды в канал и поддерживать в нем высокие скорости течения, предотвращая его заносимость. Кроме того, такая конфигурация канала существенно упрощает технологические операции по его разработке.

Для создания канала с указанными выше параметрами необходимо будет изъять из надводной части побочня и подводных склонов русла около 714 тыс. м³ песка. Это, безусловно, достаточно значительная величина, однако для практики русловыправительных работ на крупных реках она не является необычной [22].

Рассмотрим поведение канала и его влияние на морфодинамику русла в условиях половодья, поскольку именно в эту фазу гидрологического цикла реки происходят наибольшие изменения рельефа русла.

Для разработки модельного гидрологического сценария и постановки реалистичных граничных условий обратимся к результатам наблюдений, выполненных на предыдущих этапах работы.

05 июня 2019 г. в период пика половодья по результатам натуральных наблюдений в створе временного поста №21 расход воды по основному руслу р. Обь был равен 4434 м³/с при отметке уровня воды на посту 5,61 м усл. (рисунок 3.11) [1]. Однако, наблюдения за

уровнями воды на посту №23, который расположен в выходном створе рассматриваемой компьютерной модели, тогда не производились.

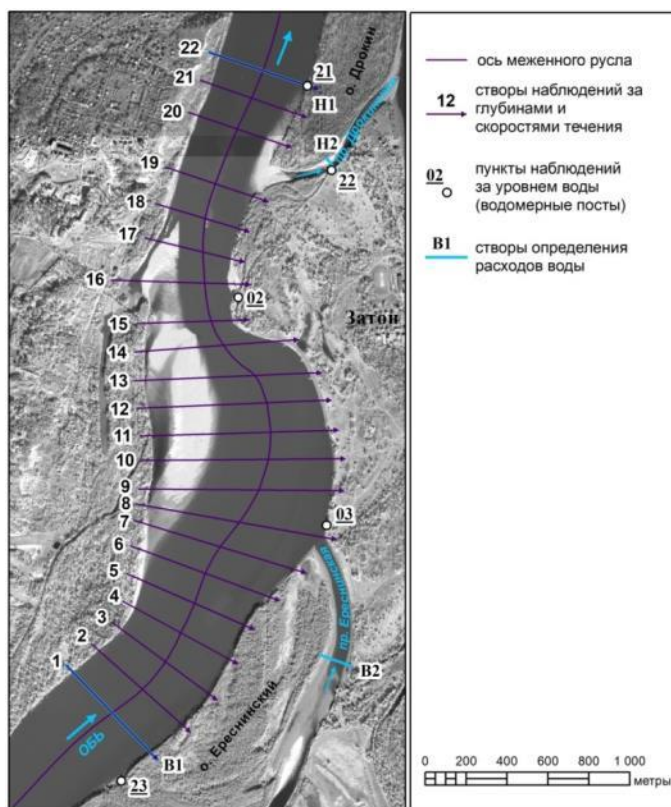


Рисунок 3.11 – Схема натурных наблюдений на участке р. Обь у пос. Затон в 2020 г [2]

Вместе с тем, по 2020 году имеется ряд синхронных наблюдений за уровнем воды на постах №№ 21 и 23 в интервале расходов 1300 – 3500 м³/с [2]. По этим данным можно составить эмпирическую зависимость связи разности отметок уровня на постах с расходом воды:

$$dz = -0.052782 \left(\frac{Q}{1000} \right) + 0.44576 \quad (3.1)$$

где dz – разность отметок уровня воды между постом №23 и постом №21, м;
 Q – расход воды, м³/с

Используя выражение (3.1), можно определить, что при расходе воды 4434 м³/с отметка уровня в выходном створе модели (пост №23 на рисунке 3.11) составляет 5,82 м усл. Заметим, что данное значение расхода воды, как видно из рисунка 1.5, соответствует периоду половодья 2020 г., которое продолжалось примерно с 09 мая по 20 июня.

Таким образом, принимается следующий модельный гидрологический сценарий: постоянный расход воды 4434 м³/с в течение 43-х дней (с 09 мая по 20 июня). Расчеты выполнялись как для естественных (бытовых) условий, так и при наличии спрямляющего канала. Основные результаты моделирования представлены на рисунках 3.12 – 3.14.

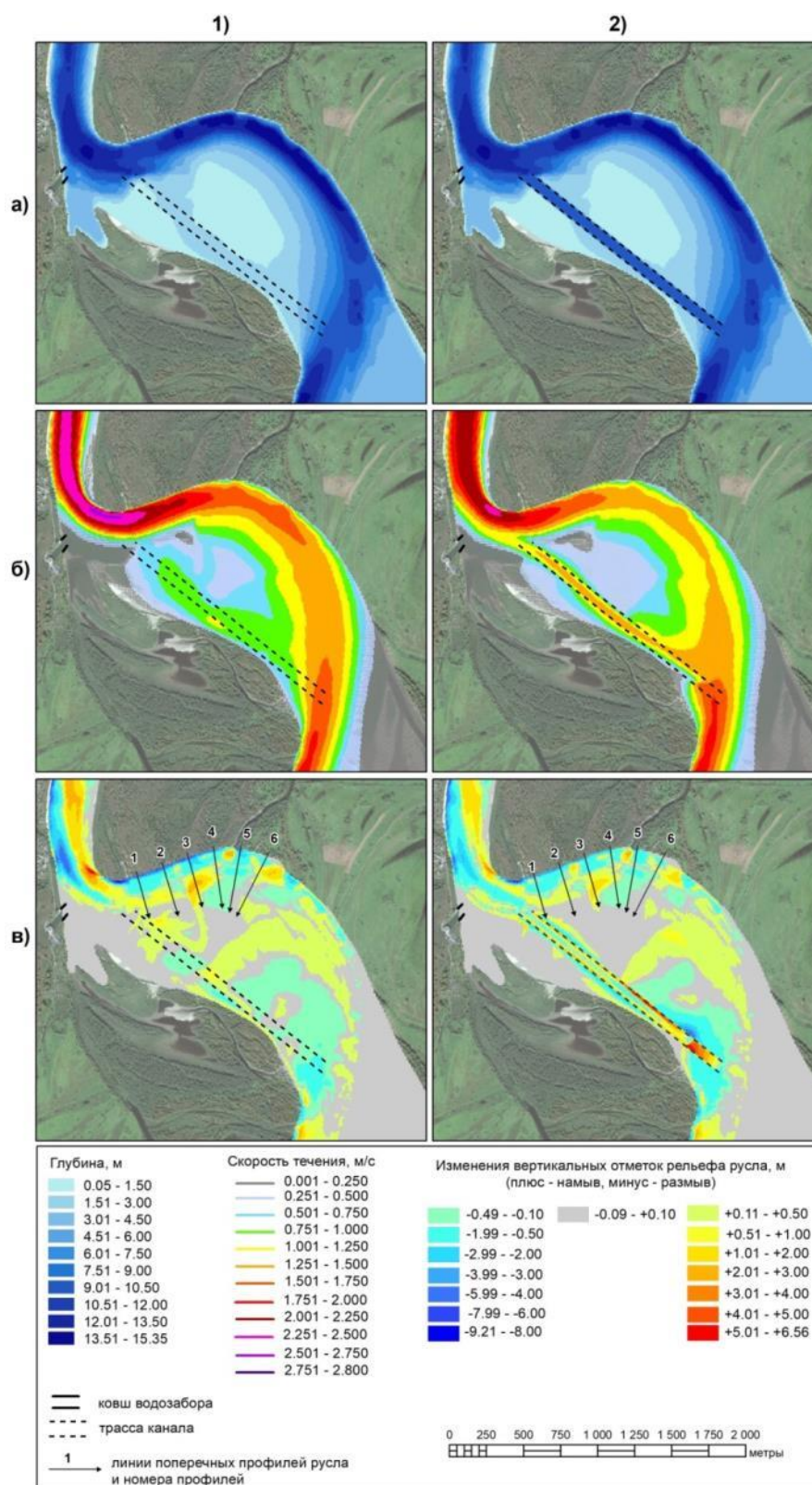
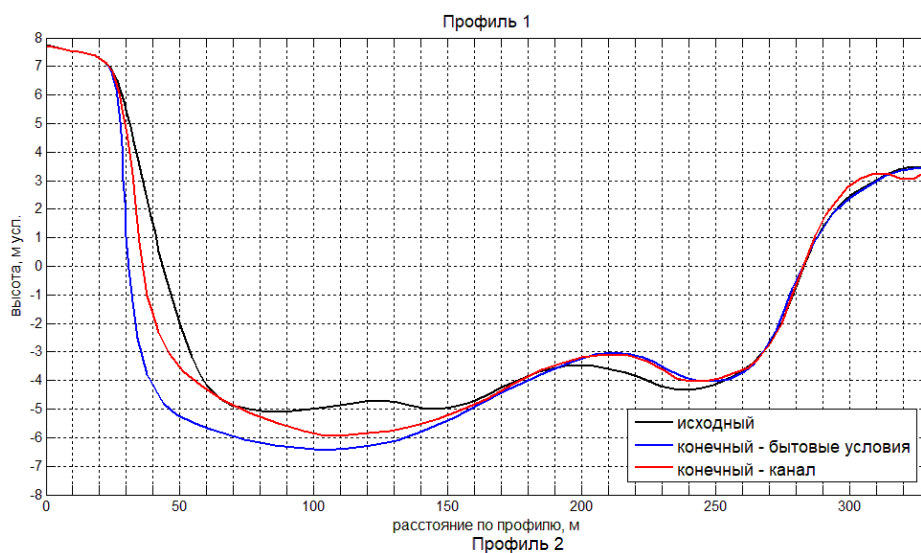
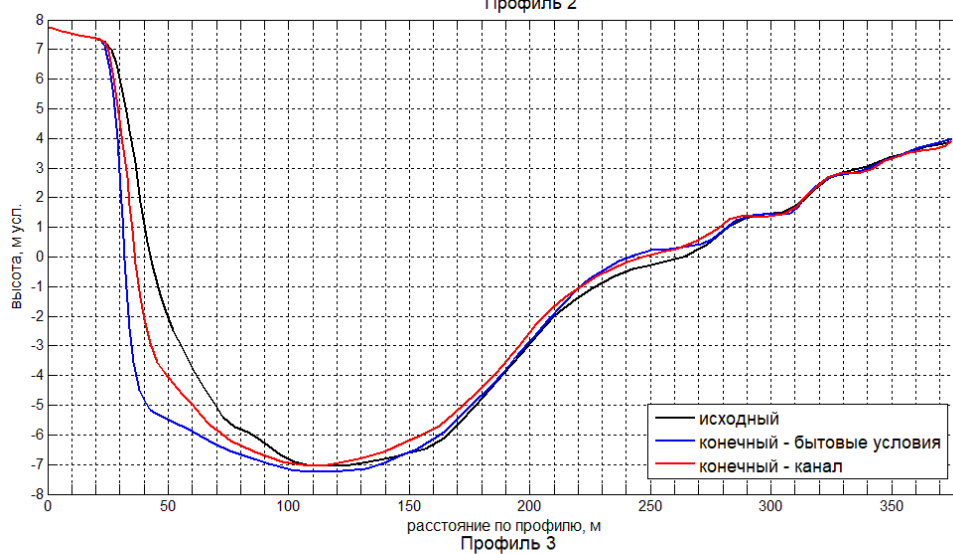


Рисунок 3.12 – Результаты компьютерного моделирования течения и русловых деформаций р. Обь у водозабора №2 в условиях модельного половодья (постоянный расход воды $4434 \text{ м}^3/\text{с}$ с 09 мая по 20 июня) в естественных условиях (1) и при наличии спрямляющего канала (2): глубина воды, 09 мая (а); осредненная по глубине скорость течения, 23 мая (б); итоговые изменения вертикальных отметок рельефа русла за период моделирования (в)

a)



б)



в)

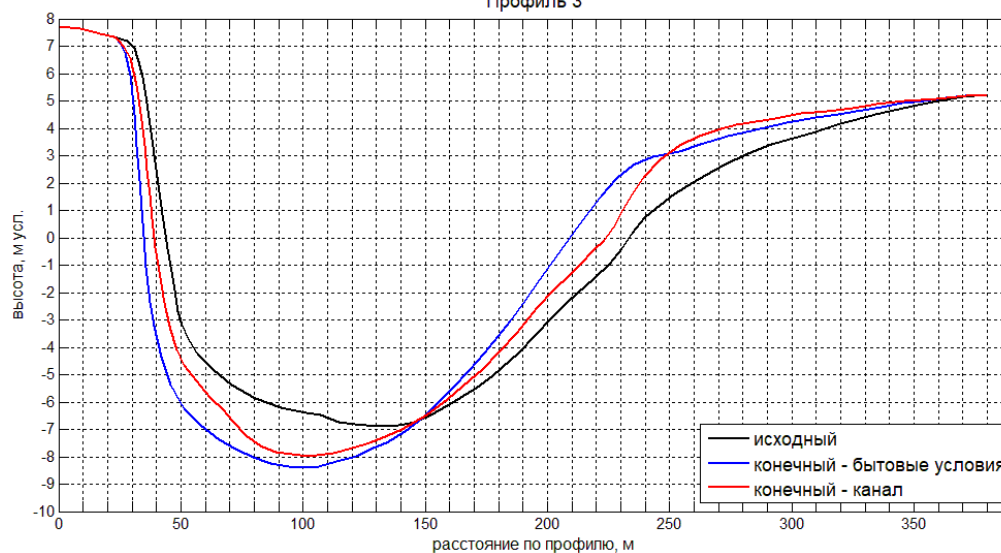
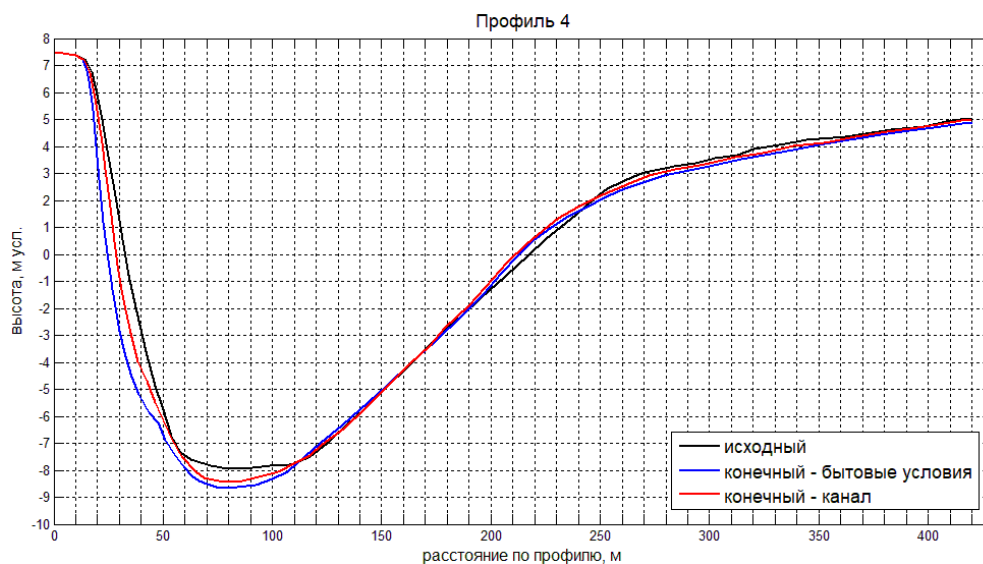
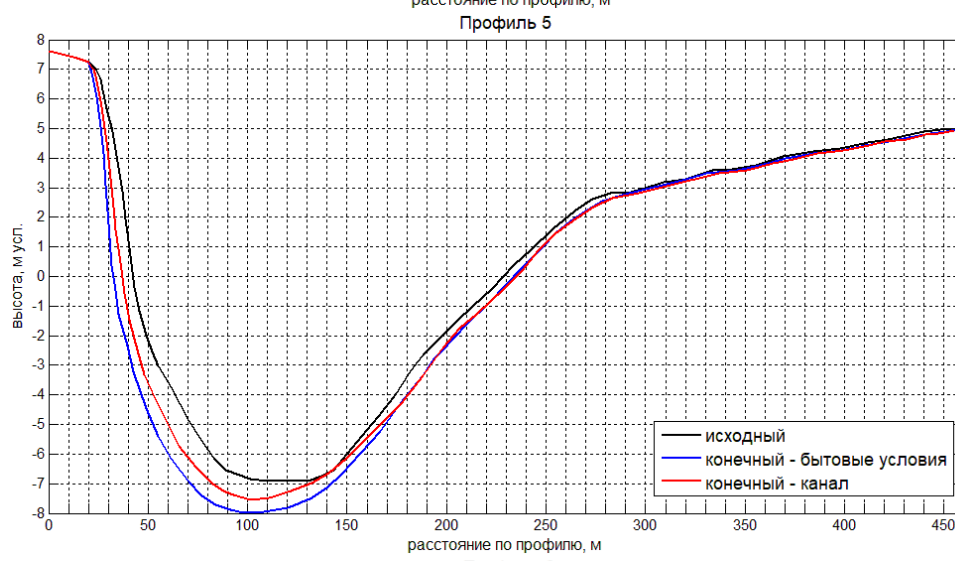


Рисунок 3.13 – Итоговые расчетные изменения рельефа русла по линиям поперечных профилей (рисунок 3.12). Профили №1 - №3

а)



б)



в)

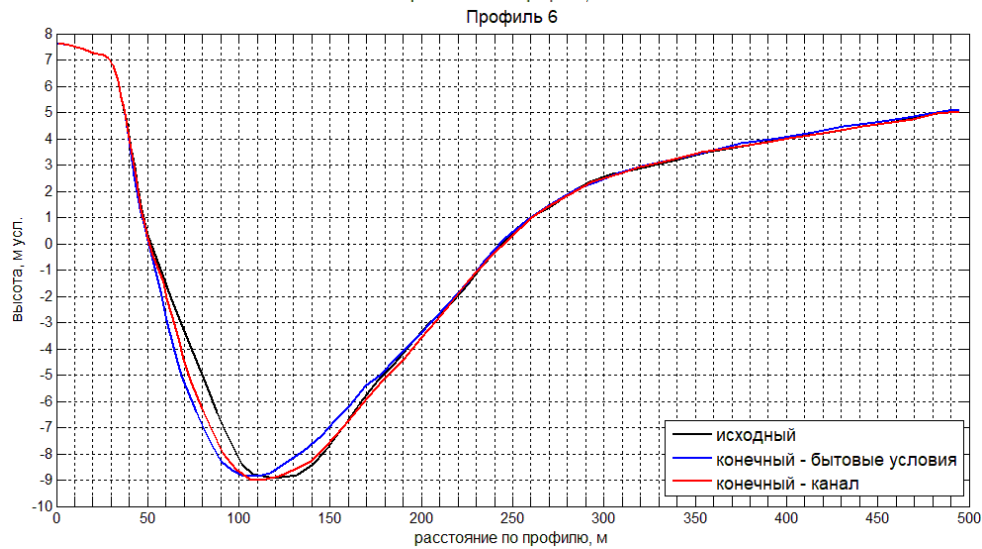


Рисунок 3.14 – Итоговые расчетные изменения рельефа русла по линиям поперечных профилей (рисунок 3.12). Профили №4 - №6

Результаты моделирования показывают, что наличие спрямляющего канала существенно снижает скорость течения в смежных крыльях свободной и вынужденной излучин (рисунок 3.12б). Как следствие, величина отступления на размываемых участках правого берега уменьшается на 25 – 50% (рисунки 3.13, 3.14).

При длительном воздействии достаточно высоких расходов воды канал в целом сохраняет свою форму. Наблюдается даже некоторый размыв его дна (рисунок 3.12в). Вместе с тем, во входной части канала имеет место мощная аккумуляция наносов. Здесь рост отметок дна столь значителен, что в условиях межени (при низких уровнях воды), вход в канал будет полностью осушен. Причины этого явления становятся ясны, если рассмотреть детальную картину течения на входе в канал, приведенную на рисунке 3.15.

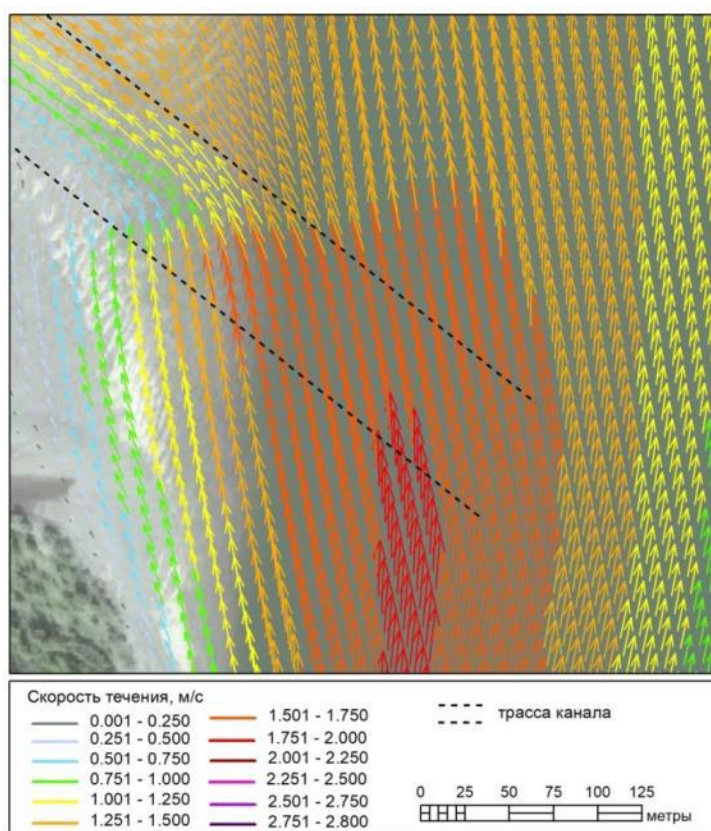


Рисунок 3.15 – Векторное поле осредненной по глубине скорости течения в окрестности входа в спрямляющий канал в условиях модельного половодья 23 мая

Как видно из рисунка 3.15, вход в спрямляющий канал расположен под значительным углом к направлению основного течения. Для того чтобы попасть в канал речной поток вынужден сделать поворот, а значит затормозиться, это торможение и приводит к интенсивной аккумуляции наносов. Вероятно, следует не делать весь канал прямолинейным, а несколько повернуть его входную часть по часовой стрелке, чтобы уменьшить угол входа потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа ретроспективных материалов космической съемки и данных собственных натуральных наблюдений сделана оценка текущей гидроморфологической ситуации на участке р. Обь у Барнаульского городского речного водозабора №2 и перспектив её дальнейшего развития.

Русло реки на данном участке образует систему двух сопряженных излучин: верхней – свободной и нижней – вынужденной. В вынужденной излучине правый пойменный берег – выпуклый, вершина излучины находится напротив сооружений водозабора, левый берег в нижнем её крыле – трудноразмываемый коренной склон долины реки. Процесс развития вынужденной излучины заключается в постепенном увеличении крутизны ее верхнего крыла относительно коренного берега с дальнейшим его заваливанием, и, итоговом спрямлении излучины.

Анализ собранных данных показывает, что в настоящее время вынужденная излучина находится на такой стадии своего развития, на которой уже возможно её спрямление. Эволюция излучины в этом направлении неуклонно продолжается. Сделаны количественные оценки темпов размыва берегов и накопления наносов в рассматриваемой системе излучин русла в окрестности водозабора №2.

Выполнен комплекс работ по исследованию характеристик крупности русловых наносов р. Обь на территории города Барнаула. На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы.

Несмотря на локальные вариации, в целом для протяженного участка русла характеристики крупности наносов достаточно однородны. Русловые наносы р. Обь на территории г. Барнаула представлены песком средней крупности с медианным диаметром около 0,26 мм.

Практически неизбежные неточности и/или неопределенности в оценке характеристик крупности русловых наносов оказывают на результаты расчета их расхода существенно меньшее влияние, чем выбор собственно расчетной формулы транспорта наносов.

Построена компьютерная модель морфодинамики участка русла реки в районе водозабора №2.

Пространственная область моделирования включает в себя систему излучин, процесс естественного развития которых уже в ближайшей перспективе угрожает работе водозабора. Общая протяженность области моделирования по руслу составляет 9,6

километра. При построении модели использованы собственные данные о рельефе и конфигурации русла, полученные в ходе русловых съемок 2017 и 2019 гг.

Выполнено моделирование течения, транспорта наносов, вертикальных и плановых русловых деформаций в нестационарных условиях спада половодья и перехода к межени. Расход воды в русле изменялся от 3030 до 1300 м³/с. Гидродинамический сценарий моделирования (значения расходов воды во входном створе и уровня воды в выходном створе) строился на основе натуральных наблюдений за параметрами руслового потока на рассматриваемом участке, выполненных в мае – октябре 2020 г. Общая продолжительность моделируемого периода – 139 дней. Продолжительность расчета – 258 часов.

Полученные результаты расчета русловых деформаций в целом согласуются с основными чертами и тенденциями развития руслового процесса на рассматриваемом участке, выявленными при анализе и оценке гидроморфологической ситуации.

Имеющиеся отличия результатов расчета от натуральных данных, как по порядку величин, так и по локализации в пространстве, обусловлены, главным образом, выбранным гидрологическим сценарием моделирования, в котором полностью отсутствует фаза нарастания и пика половодья. В то время как среднемноголетние натурные данные по скорости отступления берега и объемам накопления наносов, полученные в ходе гидроморфологического анализа, эту фазу учитывают.

Тем не менее, полученные расчетные значения отступления бровки берега и объема накопленных наносов при данном гидрологическом сценарии (т.е. для периода спада половодья и перехода к межени) можно считать вполне реалистичными.

Продемонстрированы возможности использования созданной компьютерной модели морфодинамики русла р. Обь у водозабора №2 в целях разработки инженерных мероприятий по противодействию негативному ходу руслового процесса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Отчет о НИР «Прогнозирование опасных гидрологических ситуаций на участках речных водозаборов на основе математического моделирования и натурных исследований русловых процессов (на примере реки Обь у г. Барнаула)». Проект РФФИ 19-41-220001 / ИВЭП СО РАН, Барнаул, 2019. – 55 с.
- 2 Отчет о НИР «Прогнозирование опасных гидрологических ситуаций на участках речных водозаборов на основе математического моделирования и натурных исследований русловых процессов (на примере реки Обь у г. Барнаула)». Проект РФФИ 19-41-220001 / ИВЭП СО РАН, Барнаул, 2020. – 66 с.
- 3 Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В. Речные излуины. М.: изд-во МГУ, 2004. – 371 с.
- 4 Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Смищенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 272 с.
- 5 Марусин К.В., Дьяченко А.В., Коломейцев А.А., Вагнер А.А. Современное состояние и динамика излуины реки Обь в районе Барнаульского водозабора №2 / Известия Алтайского отделения Русского географического общества. – 2018 – №4(51) – с. 63-71.
- 6 Марусин К.В., Дьяченко А.В., Коломейцев А.А., Вагнер А.А. Современная динамика русла реки Обь в районе Барнаульского водозабора №1 по данным натурных наблюдений / Известия Алтайского отделения Русского географического общества. – 2017 – №4(47) – с. 52-61.
- 7 Google Earth. Самый подробный глобус. – URL: <https://www.google.com/earth/> (дата обращения: 2021-12-23)
- 8 ГИС-портал Центра регистра и кадастра. Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России. – URL: <http://gis.vodinfo.ru> (дата обращения: 2020-12-23)
- 9 Барышников Н.Б. Русловые процессы. Учебник. – СПб.: изд. РГГМУ, 2006. – 439 с.
- 10 Гришанин К.В. Основы динамики русловых потоков: Учебник для институтов водн. трансп. – М. Транспорт, 1990. – 320 с.
- 11 Гришанин К.В. Динамика русловых потоков: Изд. 2-е. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 312 с.
- 12 Van Rijn L.C. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. – Aqua Publications, The Netherlands, 1993. – 689 p.

13 Чекренев А.И., Гришанин К.В. Водные пути. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1975. – 472 с.

14 Дьяченко А.В., Марусин К.В., Коломейцев А.А., Вагнер А.А. Натурные исследования поля скоростей течения в излучинах реки Обь на территории города Барнаула / Известия Алтайского отделения Русского географического общества. – 2018 – №2(49) – с. 58-66.

15 Шестова М.В. Гидрологический режим нижних бьефов ГЭС и его влияние на условия судоходства: дис. ... канд. техн. наук : 05.22.19 : защищена 12.12.2006 / Шестова Марина Вадимовна. – Н. Новгород: РГБ, 2007. – 177 с.

16 Zinoviev A.T., Dyachenko A.V., Koshelev K.B., Marusin K.V. Modeling of channel processes in large rivers with the use of field data // Eurasian Journal of mathematical and computer applications. – Volume 9, Issue 1 (2021) – P. 87-102

17 Зиновьев А.Т., Дьяченко А.В., Кошелев К.Б., Марусин К.В. Моделирование и наблюдения русловых процессов на реках Сибири на примере реки Обь у города Барнаула // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Междунар. науч. конгр., 19–21 мая 2021 г., Новосибирск: сб. материалов в 8 т. Т. 4 : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2021., с. 126-136

18 Дьяченко А.В., Марусин К.В., Коломейцев А.А., Вагнер А.А. Натурные исследования пропускной способности рукавов русловых разветвлений и пойменных протоков реки Обь на участке Барнаул – Камень-на-Оби / Известия Алтайского отделения Русского географического общества. – 2017 – №3(46) – с. 54-63

19 Delft3D-FLOW User Manual. WL / Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands, 2013. – 706 p.

20 Даревский В.Э. Проектирование сооружений, обеспечивающих устойчивость грунтовых массивов (набережные, берегоукрепления, подпорные стены, защита от оползней и пр.) / В.Э. Даревский, А.М. Романов. Гипроречтранс. М.: ООО «Издательство Мастер», 2011. – 596 с.

21 Методика оценки вероятностного ущерба от вредного воздействия вод и оценки эффективности осуществления превентивных водохозяйственных мероприятий. ФГУП «ВИЭМС» - М., 2006. – 98 с.

22 Дегтярев В.В. Информационно-справочные материалы по водным путям Сибири и Якутии. – Новосиб. гос. акад. водн. трансп. – Новосибирск: НГАВТ, 2008. – 74 с.