

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК**  
**СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ**  
Институт водных и экологических проблем

УДК 532.5; 532.5.032  
№ госрегистрации  
Инв. №

УТВЕРЖДАЮ:  
Директор ИВЭТ СО РАН



д.б.н. А.В.Пузанов  
2019 г.

**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**

Руководитель проекта,  
зав. лабораторией гидрологии и  
геоинформатики,  
д.т.н.

А.Т. Зиновьев

Нормоконтролёр  
с.н.с, к.с-х.н.

Е.Д. Кошелева

Барнаул-2019

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель проекта,  
д.т.н.



А.Т. Зиновьев (введение,  
заключение, разделы 3, 6)

Исполнители проекта:  
с.н.с., к.ф-м.н.



К.Б. Кошелев (разделы 3,  
5, 6)

с.н.с.



О.В. Ловцкая (разделы 2, 6)

н.с.



К.В. Марусин (разделы 1, 2,  
4, 5, 6)

вед. инж.



А.А. Вагнер (разделы 1, 2, 4)

Нормоконтролёр,  
с.н.с., к.с-х.н.



Е.Д. Кошелева

## РЕФЕРАТ

Отчет 55 с., 6 разделов, 31 рисунок, 4 таблицы, 25 источников.

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

Объект исследования – участок р. Обь на территории г. Барнаула в районе расположения городских речных водозаборов протяженностью 20,4 км. Цель работ - 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). Разработана комплексная математическая модель течения и транспорта взвешенных и влекомых речных наносов. Выполнены натурные исследования на объекте для обеспечения модели исходными данными и информацией для её калибровки и верификации. Выполнено компьютерное моделирование руслового процесса в пределах активной фазы гидрологического цикла от момента вскрытия реки до наступления осенне-зимней межени, которое дало хорошее качественное соответствие результатов расчета с данными натурных наблюдений. Результаты расчетов правильно отражают основные черты руслового процесса, протекающего на рассматриваемом участке в современных условиях.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 Характеристика объекта исследований .....	6
2 Эволюция русла реки Обь у города Барнаула за 65 лет .....	17
3 Комплексная компьютерная модель течения и транспорта взвешенных и влекомых речных наносов .....	23
4 Натурные исследования .....	26
4.1 Исследования прошлых лет .....	26
4.2 Полевые работы 2019 года .....	31
5 Компьютерное моделирование .....	35
5.1 Исходные данные .....	35
5.2 Численная реализация .....	39
6 Результаты моделирование и обсуждение .....	41
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	53
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	54

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящем отчете представлены результаты исследования, 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 работ состоит в том, чтобы создать математическую и компьютерную модели русловых процессов, адекватно описывающих 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).

Создание такой компьютерной модели позволит а) выявить общие тенденции и локальные особенности хода руслового процесса на рассматриваемом участке русла р. Обь; б) исследовать влияние руслового процесса на объекты хозяйственной инфраструктуры, расположенные в русле р. Обь и вблизи него (городские водозаборы, объекты судоходства, переходы ЛЭП, водовыпуски); в) исследовать влияние существующих и перспективных техногенных воздействий на русловой процесс (берегозащитные сооружения, мостовые переходы, дноуглубительные и русловыправительные работы).

Объект исследования – участок р Обь на территории г. Барнаула, который характеризуется наличием в русле реки и вблизи него значительного числа объектов хозяйственной инфраструктуры, имеющих критически важное значение.

Программа работ по Проекту предусматривала решение следующих задач:

Сбор, анализ, обобщение имеющихся гидрологических, гидрографических и топографических данных по участку.

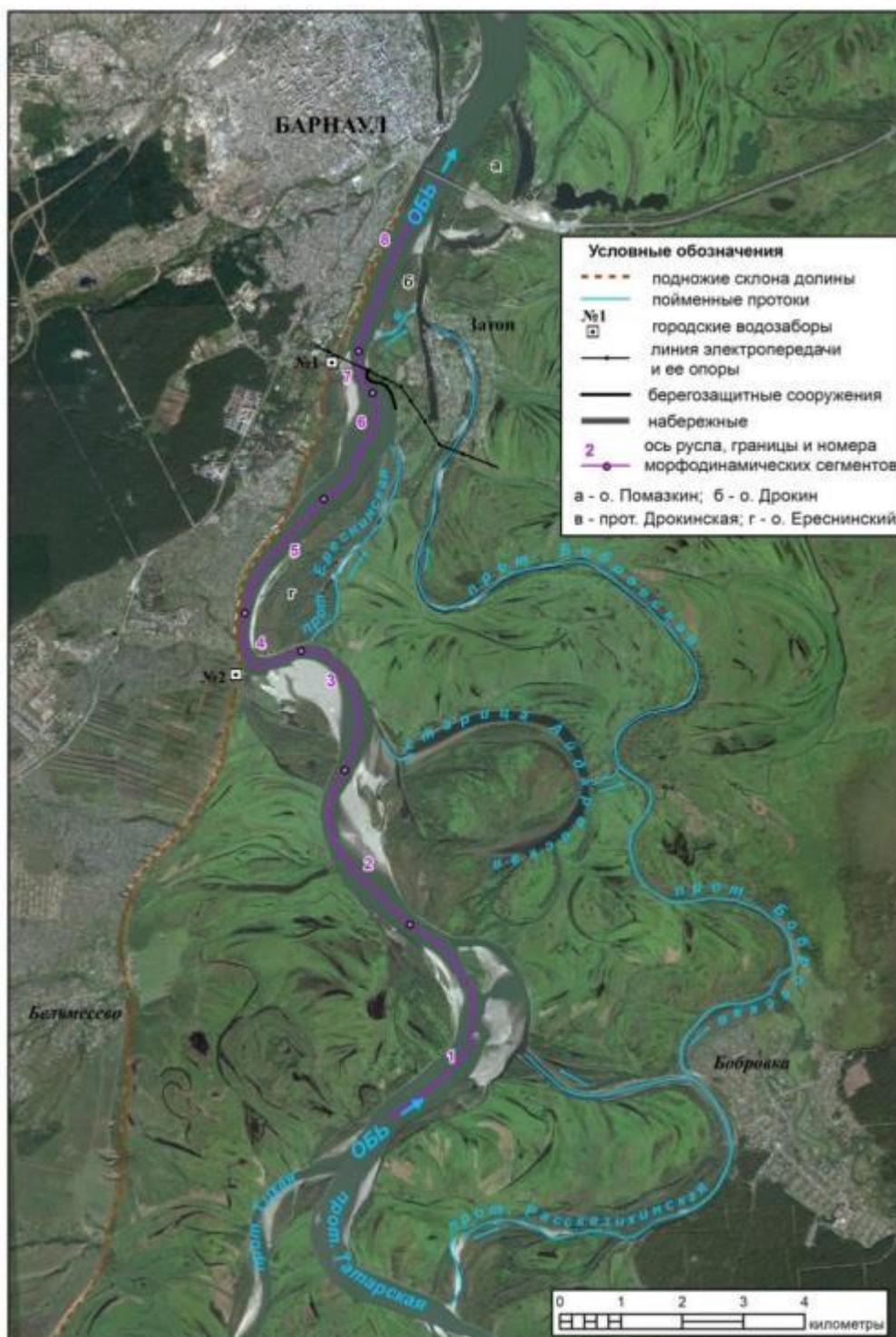
Построение компьютерной модели руслового процесса на участке.

Проведение натурных топографических и гидрографических работ с целью уточнения и дополнения имеющихся данных, а также для сбора информации необходимой для калибровки и верификации построенной компьютерной модели.

Проведение расчетов и анализ полученных результатов.

## 1 Характеристика объекта исследования

Объект исследования – участок реки Обь на территории города Барнаула от слияния проток Тихая и Татарская до нового автомобильного моста. Его протяженность по руслу реки составляет 20,4 км (рис. 1.1).



Подложка – коллаж спутниковых снимков из коллекции Google Digital Globe, дата съемки 07 сентября 2016 г. [1].

Рисунок 1.1 – Схема участка исследования

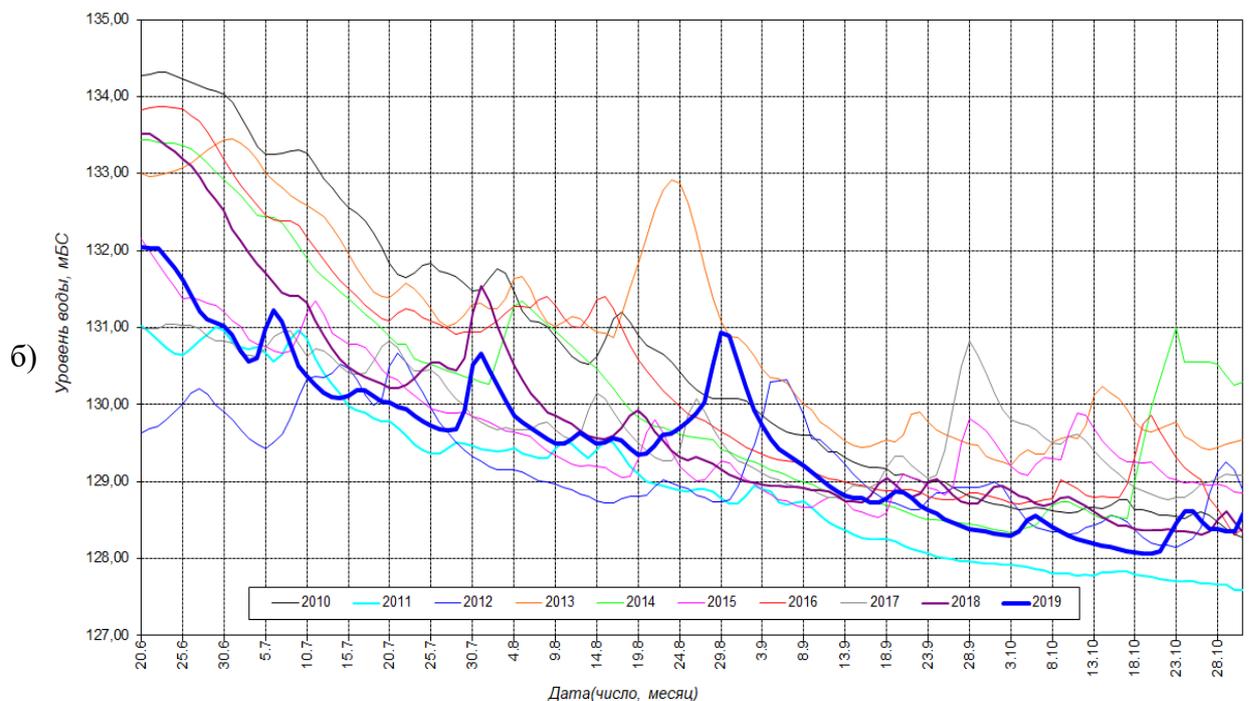
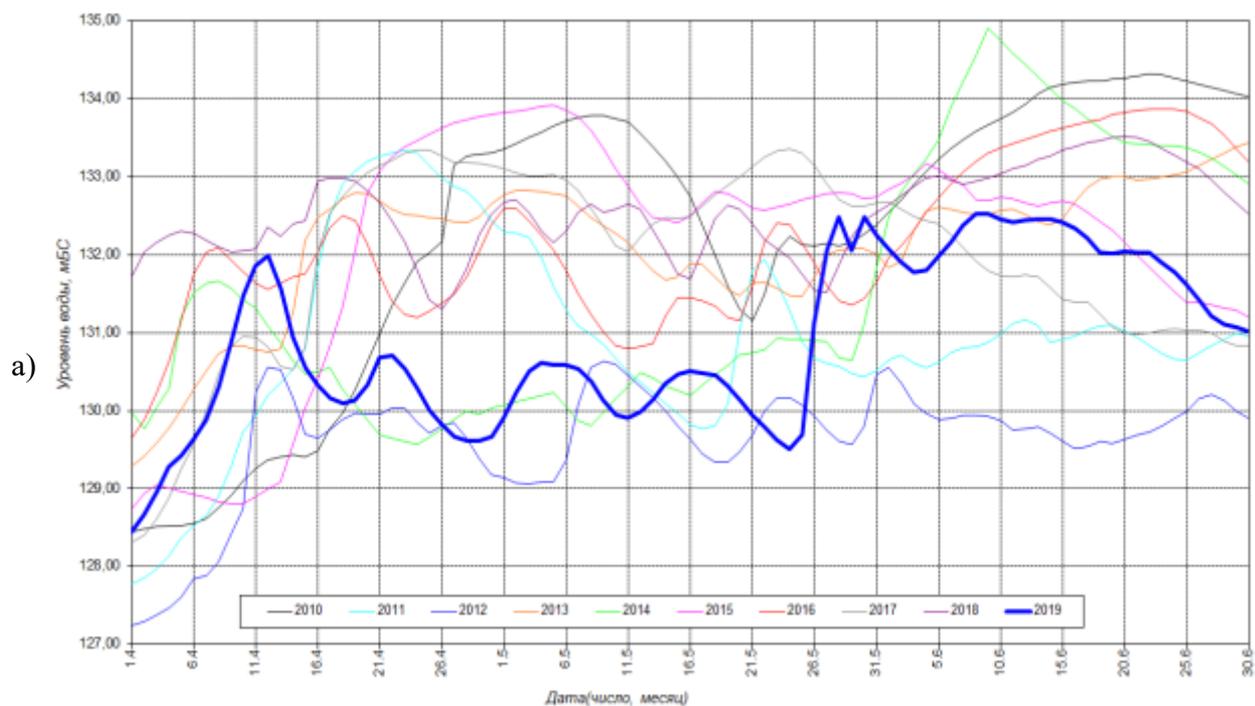
В пределах рассматриваемого участка река Обь протекает в генеральном направлении с юго-юго-запада на северо-северо-восток вдоль левого крутого и трудно-размываемого склона своей долины.

По левому берегу пойма представлена отдельными, иногда довольно обширными фрагментами. Правый берег реки в районе г. Барнаула, и на рассматриваемом участке в частности, всюду пойменный. Пойма имеет ширину до 10 километров с многочисленными озерами, старицами и протоками. Поверхность поймы в целом ровная, возвышающаяся над меженным урезом воды, в среднем, на 3 - 4 м.

В верхней части участка в основное русло впадает протока Рассказихинская, от которой отходит протока Бобровская. Эта протока протекает по правобережному пойменному массиву на удалении 1 - 4 км от основного русла и впадает в него через Шубинский затон вблизи нижней границы участка. Её протяженность – 21,4 км. Протока Бобровская имеет промежуточное сообщение с основным руслом через старицу Айдаровскую и короткий (0,6 км) проток. Кроме Бобровской протоки, в пределах рассматриваемого участка по правобережной пойме проходят еще две протоки – Ереснинская и Дрокинская протяженностью, соответственно, 3,8 и 0,9 км. Как показывают, проведенные нами ранее исследования, наиболее крупная и длинная из указанных проток – Бобровская в условиях пика половодья пропускает около 8% от общего расхода реки. При снижении водности реки в период спада половодья протоки достаточно быстро деградируют, в межень течение в них отсутствует [2].

В условиях межени ширина основного русла реки (далее для краткости - русло) на рассматриваемом участке составляет 300 – 600 м. Характерные глубины на относительно мелководных участках (перекатах) – 2-3 м, на относительно глубоководных (плёсовых лощинах) – 6-8 м.

Вскрытие реки и освобождение её ото льда происходит обычно в период с 5 по 15 апреля. Затем начинается подъем уровня воды, обусловленный таянием снега вначале в равнинной, а затем в горной части речного бассейна. Наибольшие уровни и расходы воды имеют место со второй половины мая по начало июля. Далее происходит постепенный спад воды, прерываемый относительно кратковременными дождевыми паводками. Осенне-зимняя межень устанавливается к началу октября. Река замерзает, как правило, в первой – второй декаде ноября. Следует отметить, что ежегодные реализации описанного выше обобщенного (характерного) гидрологического режима реки отличаются большим разнообразием, особенно в период половодья. Это хорошо видно из приведенных на рис. 1.2 данных наблюдений на гидрологическом посту (г\п) Барнаул сети Росгидромета, расположенном в 5,5 км ниже рассматриваемого участка.



а) половодье (01.04 – 30.06); б) спад половодья и межень (20.06 – 31.10)

Рисунок 1.2 – Динамика отметки уровня воды на г\п Барнаул за 2010 – 2019 гг. в характерные периоды [3]

Например, в 2018 г. резкий подъем воды произошел еще до вскрытия реки – в последних числа марта – первых числах апреля. Он был вызван обильными дождевыми осадками, выпавшими в это время в предгорной и равнинной части бассейна Верхней Оби. В этом году имела место длительная, более месяца, пауза (период снижения уровня) между первой волной половодья, обусловленной таянием снега в равнинной части

бассейна, и второй волной, связанной с таянием снега в горах. А вот в 2017 г. такая пауза практически отсутствовала (рис. 1.2).

Данные о максимальных расходах воды по г\п Барнаул представлены в таблице 1.1. К сожалению, информация о расходах воды за более поздние сроки в открытом доступе пока отсутствует.

Таблица 1.1 – Максимальные значения расходов воды по г\п Барнаул за 2010 – 2015 гг. [3]

Годы	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Максимальный расход воды, м <sup>3</sup> /с	6340	4600	2470	5160	8150	5080

Чтобы, хотя бы отчасти, восполнить этот пробел, а также дать представления о значениях расхода воды на спаде половодья и в межень, приведем некоторые данные собственных измерений в 2016 – 2019 гг. Определение расходов воды выполнялось в трех створах (рис. 1.3), один из которых совпадает с гидрометрическим створом г\п Барнаул, с помощью акустический доплеровский профилограф-расходомер Sontek M9 River Surveyor Live [2, 4]. Результаты измерений представлены в таблице 1.2.



Рисунок 1.3 – Створы определения расхода воды ИВЭП в 2016 – 2019 гг.

Таблица 1.2 – Результаты определения расходов воды р. Обь на территории г. Барнаула

Дата измерений	Время начала измерений (местн.)	Створ (рис. 1.3)	Расход воды, м <sup>3</sup> /с
25 июня 2016	12:00	1	5350
19 сентября 2016	18:45	3	1116
22 мая 2017	10:55	2	4989
23 мая 2017	18:00	3	4541
11 июня 2017	10:08	2	3131
21 июля 2017	09:44	2	2313
20 сентября 2017	16:20	3	1329
05 июня 2018	11:11	1	4485
09 июня 2018	12:19	1	4461
19 июля 2018	12:50	1	1955
21 сентября 2018	14:59	3	1079
28 мая 2019	19:55	3	3900
03 июня 2019	20:07	3	3060
20 сентября 2019	09:48	3	1139
10 октября 2019	14:40	3	857

Рассматриваемый участок реки имеет существенное значение для хозяйственной деятельности. Здесь располагаются оба муниципальных речных водозабора (№1 и №2), обеспечивающие до 90% потребности города в питьевой воде, а также переход высоковольтной линии электропередач (рис. 1.1). По реке в пределах участка осуществляется регулярное пассажирское судоходство. На правобережной пойме, вблизи основного русла располагается микрорайон Затон с населением около 3 тыс. человек. Также следует упомянуть о проекте сооружения еще одного автомобильного мостового перехода через р. Обь, предусмотренного генеральным планом развития Барнаула [5]. Мост предполагается разместить непосредственно выше старицы Айдаровской, а путепровод к нему полностью перекроет правобережный пойменный массив. По наблюдениям авторов в 2017 гг. в этом районе уже велись активные изыскательские работы.

Пользуясь классификацией Р.С. Чалова [6], русло реки Обь на рассматриваемом участке можно разбить на последовательные сегменты, относящиеся к тому или иному морфодинамическому типу русла (рис. 1.1). Принадлежность к определенному типу определяет общие тенденции развития русла, направленность и интенсивность его деформаций, прежде всего, плановых.

Сегменты 1 и 2 в верхней части участка – это свободные излучины, находящиеся на сравнительно ранних стадиях своего развития. Характерной чертой эволюции таких излучин является активный размыв нижнего крыла вогнутого берега. Следует отметить, что излучина 1 в прошлом уже подвергалась частичному спрямлению, но сейчас вновь

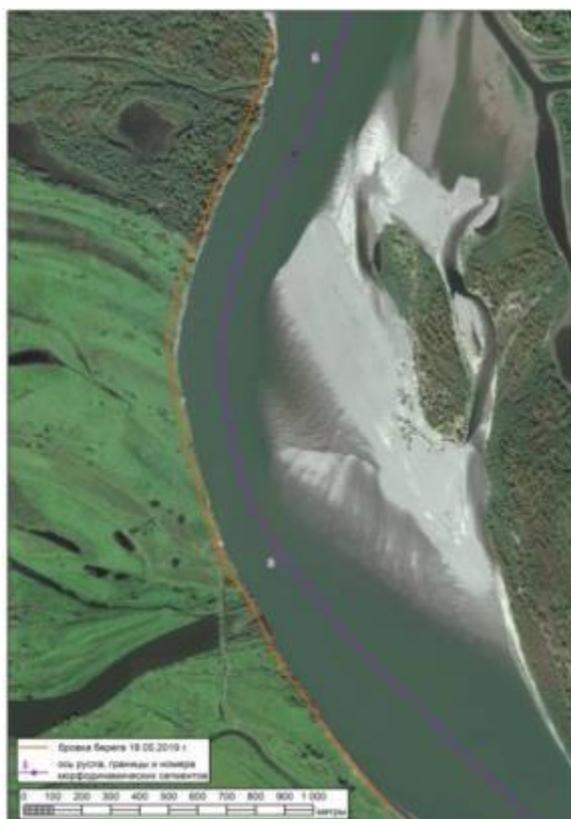
развивается. Как показало проведенное нами весной этого года обследование, в ходе которого текущее положение бровки берега трассировалось навигационным GPS приемником, берег в этих излучинах отступил за два года на 20-30 м, а в излучине 1 величина отступления достигает 80 м. (рис. 1.4, 1.5).



Подложка – спутниковый снимок 07.09.2016 г.

Положение бровки берега на 18.05.2019 г. – по данным обследования.

Рисунок 1.4 – Изменение пространственного положения бровки берега за период с 07.09.2016 по 18.05.2019. Морфодинамический сегмент 1 (рис. 1.1)



Подложка – спутниковый снимок 07.09.2016 г. Положение бровки берега на 18.05.2019 г. – по данным обследования.

Рисунок 1.5 – Изменение пространственного положения бровки берега за период с 07.09.2016 по 18.05.2019. Морфодинамический сегмент 2 (рис. 1.1).

Сегменты 3 и 4, расположенные в окрестности водозабора №2, образуют систему двух сопряженных излучин: верхней – свободной и нижней – вынужденной. 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 склона долины Оби. Поэтому излучина и называется «вынужденной», трудноразмываемый берег этого склона вынуждает речной поток, подходящий к нему под углом, сделать поворот и следовать вдоль берега. В общих чертах процесс развития вынужденной излучины заключается в постепенном увеличении крутизны ее верхнего крыла относительно коренного берега с дальнейшим его «заваливанием», и, итоговым спрямлением излучины [7]. Как показало проведенное нами весной этого года обследование, правый пойменный берег в смежных крыльях излучин отступил за два года на 50-60 м (рис. 1.6).



Подложка – спутниковый снимок 07.09.2016 г.

Положение бровки берега на 18.05.2019 г. – по данным обследования

Рисунок 1.6 – Изменение пространственного положения бровки берега за период с 07.09.2016 по 18.05.2019 в окрестности водозабора №2 – морфодинамические сегменты 3 и 4 (рис. 1.1).

В выполненном нами ранее исследовании показано, что современное состояние вынужденной излучины у водозабора №2 можно отнести к предпоследней стадии ее развития [8]. На этой стадии уже возможно спрямление излучины, а на финальной стадии, которая по нашим оценкам будет достигнута примерно через тридцать лет, оно произойдет обязательно, причем в самое ближайшее время. Очевидно, что спрямление

вынужденной излучины, каким бы путем оно не реализовывалось – по протоке Ереснинской или непосредственно по телу пойменного массива, будет являться полной катастрофой для водозабора №2.

Сегмент 5 представляет собой участок слабоизогнутого («прямолинейного» в терминологии Чалова) русла с относительно стабильными берегами. Здесь вдоль левого берега пролегает неширокая, но довольно глубокая плёсовая лощина.

Сегменты 6 и 7, расположенные в окрестности водозабора №1, образуют систему двух сопряженных излучин: верхней – свободной и нижней – вынужденной, то есть по морфодинамической классификации они однотипны сегментам 3 и 4 у водозабора №2.

История влияния руслового процесса реки Обь на функционирование Барнаульского городского водозабора №1 хорошо известна и весьма показательна. Она нашла отражение не только в специальной литературе, в том числе и фундаментального характера [6, 7, 9, 10], но даже на страницах научно-популярных изданий [11].

Барнаульский водозабор №1 был введен в эксплуатацию в 1965 г. Однако, сформировавшийся к концу 70-х годов прошлого века непосредственно выше водозабора левобережный пойменный массив и прилегающая к нижней оконечности этого массива крупная надводная русловая форма – побочень блокируют его работу. Для обеспечения функционирования водозабора приходится чуть ли не ежегодно разрабатывать канал через тело побочня длиной более 300 м (рис. 1.7).

а)



б)



а) фото 20.09.2017 г., вид с левобережного побочня;  
б) снимок спутника Ресурс-П, дата съемки – 30.09.2018 г.  
Рисунок 1.7 – Разработка подходного канала к водозабору №1

Правый вогнутый берег реки в окрестности водозабора в своем нижнем крыле интенсивно разрушался, что создавало угрозу опоре ЛЭП. Для предотвращения этой угрозы его участок в верхнем крыле вынужденной излучины от створа перехода ЛЭП на 320 м вверх по течению в конце 80-х годов был укреплен каменно-набросным банкетом из крупнообломочной горной массы. Но, продолжавшийся размыв вышележащего участка привел к «охвату» рекой верхнего фланга сооружения, причем с годами масштаб этого явления все увеличивался (рис. 1.8). Так что пришлось в 2011 г. не только произвести капитальный ремонт существующего сооружения, но и продлить берегозащитное покрытие еще на 580 м вверх по течению.



а)



б)

а) разрушение каменно-набросного защитного покрытия постройки 80-х годов и размыв пойменного массива

б) верхний фланг сооружения

в) пролив между руслом реки и пойменным озером, ширина пролива около 40 м



в)

Рисунок 1.8 – Участок правого берега р. Обь в окрестности водозабора №1, фото 01 июля 2008 г.

Однако, как показывают наши наблюдения, уже к концу текущего года в сооружении постройки 1980-х годов на протяжении 110 м наблюдается полное разрушение каменно-набросного покрытия в верхней половине берегового откоса, каменной одеждой теперь прикрыта лишь его приурезовая полоса при меженных уровнях воды. В гребне нового сооружения (постройки 2011 г.) сформировались две промоины, через которые при высоких уровнях воды речной поток поступает в пойменное озеро, расположенное в его тылу. На верхней оконечности защищенного участка наблюдается непрерывный рост локального «кармана размыва», причем процесс разрушения берега уже проник вглубь поймы за

линию укрепленной полосы. Так что процесс охвата рекой верхнего фланга берегоукрепления фактически уже завершен. Кроме того, оставшийся незащищенным участок правого берега вплоть до устья протоки Ереснинской также разрушается и отступает, пусть и сравнительно медленно (3-4 м/год), но неуклонно (рис. 1.9).

а)



б)



в)



г)



а) разрушенный участок берегозащитного сооружения постройки 80-х годов; б) промоина в гребне берегозащитного банкета постройки 2011 г справа – р. Обь, слева – пойменное озеро; в) «карман размыва» на верхнем фланге берегозащитного сооружения; г) неукрепленный участок берега между верхним флангом сооружения и устьем протоки Ереснинской.

Рисунок 1.9 – Участок правого берега р. Обь в окрестности водозабора №1, фото 2019 г.

Можно полагать, что уже через несколько лет ситуация на участке будет похожа на картину, представленную выше на рис. 1.8.

Все описанные выше факты есть отражение процесса смещения смежных крыльев вынужденной и свободной излучин, происходящего в полном соответствии со сценарием эволюции данной системы излучин, в чистом виде реализующимся на участке у водозабора №2. В то же время, техногенные воздействия сдерживают и искажают естественный ход руслового процесса, создавая на данном участке русла весьма своеобразную гидроморфологическую ситуацию.

Завершающий сегмент 8 – есть участок практически прямолинейного русла. Здесь, как и в сегменте 5, вдоль левого берега пролегает неширокая, но довольно глубокая плёсовая лощина. Правый пойменный берег в пределах сегмента иногда, в многоводные годы, испытывает незначительный размыв, но в целом, может считаться практически стабильным. В последние два года здесь даже наблюдается накопление наносов (рис. 1.10).

а)



б)



а) вид вниз по течению, на заднем плане – автомобильный мост; б) вид вверх по течению, на заднем плане – левобережная опора перехода высоковольтной ЛЭП

Рисунок 1.10 – Правый берег р. Обь на острове Дрокин

## 2 Эволюция русла реки Обь у города Барнаула за 65 лет

В предыдущем разделе мы отметили основные черты руслового процесса на исследуемом участке в настоящее время. Для того чтобы дать представление о его возможных масштабах в пространстве и во времени рассмотрим здесь эволюцию русла р. Обь у города Барнаула за 65 лет (с 1951 по 2016г.).

Основой для такого рассмотрения послужили крупномасштабные топографические карты. Следует отметить, что они являются весьма ценным материалом для исследователя русловых процессов.

Из крупномасштабных топографических карт (масштаб 1:25000 и крупнее) можно извлечь подробную, пространственно-точную и согласованную информацию о состоянии русла. Стандартное содержание крупномасштабной топографической карты позволяет установить плановые очертания берегов реки, островов и конфигурацию русловых форм в известный момент времени. Год, на который отображено состояние местности, обязательно указывается на листе карты. Кроме того, на карте приводятся отметки уреза воды в общегосударственной системе высот с точностью до дециметров для условий летней межени [12]. Единственным ограничивающим фактором в данном случае выступает их закрытый характер. Однако когда появляется возможность без нарушения режимных ограничений извлечь с таких карт нужную информацию и ввести ее в научный оборот, этой возможностью надо пользоваться.

В нашем распоряжении имелись три такие карты:

1. Листы топографической карты масштаба 1:25000, составленной по результатам съемки 1951 г., издания 1978 г. Следовательно, карта отражает состояние местности в 1951 г.
2. Листы топографической карты масштаба 1:10000, составленной по результатам съемки 1977-78 гг. К сожалению, та зарамочная часть листов, где указан год издания карты, утрачена. Будем относить состояние местности на этой карте к 1978 г.
3. Листы топографической карты масштаба 1:25000 издания 2001 г с состоянием местности на 01 января 1999 г., т.е. на конец 1998 г. В действительности съемки большей части территории рассматриваемого нами участка проводились осенью 1996 г., один из авторов был свидетелем этих работ. Однако, примем, следуя официальному указанию, что карта изображает местность в 1998 г.

Первый две карты хранятся в фондах ИВЭП СО РАН, листы третьей карты (1998 г.) были получены нами во временное пользование из Государственного картографического фонда.

Задача состояла в том, чтобы по имеющимся топографическим картам идентифицировать конфигурацию русла в прошлом и сравнить полученные данные с его современным состоянием, представленным на спутниковом снимке за 07 сентября 2016 г. (рис. 1).

Для объяснения методики идентификации положения русла по топографическим картам дадим предварительно определения основных морфологических элементов русла [13].

Русло – наиболее углубленная часть долины реки, в пределах которой речная вода течет круглый год.

Пойма – низкая, но возвышающаяся над руслом, часть долины, заливаемая речным потоком только при высоких уровнях воды (в половодье). Пойма слагается из грунтов, нанесенных рекой (аллювиальных). В отличие от русла пойма покрыта растительностью.

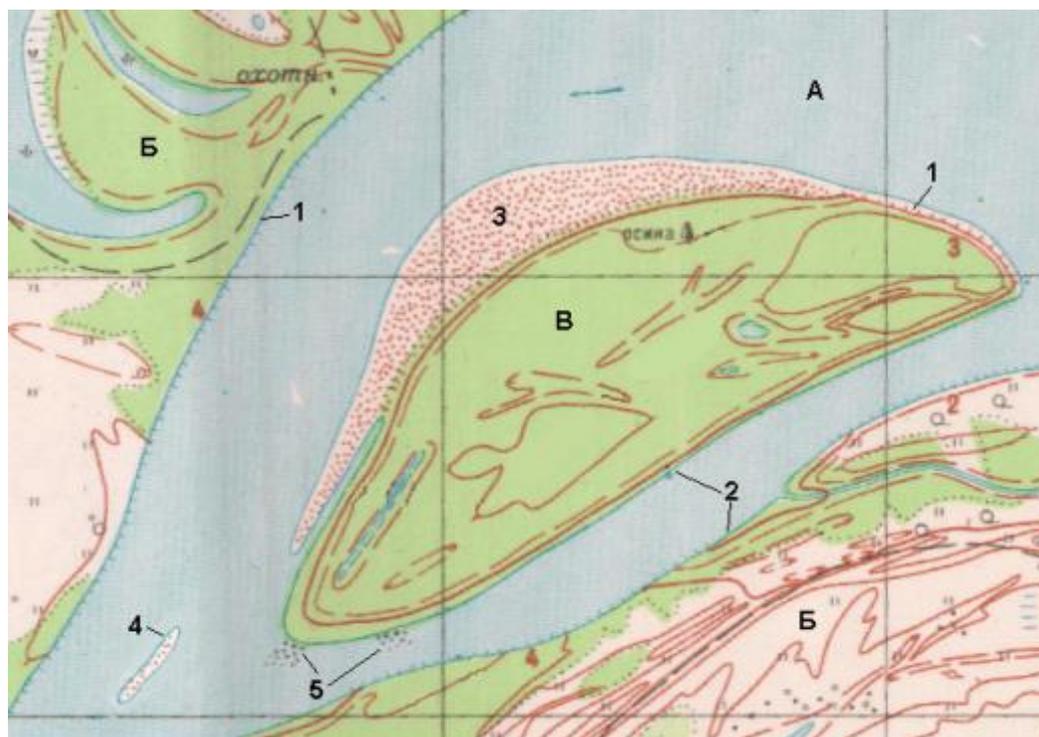
Русло в долине ясно отделяется от поймы, представляя собой резкое углубление. На границе между поймой и руслом поперечный профиль долины реки имеет перелом. Место перелома носит название бровки берега.

Бровка берега очерчена ясно, если берег реки крутой и обрывистый (яр). Если же берег имеет пологий склон, поверхность поймы плавно сопрягается со склоном русла. В этом случае переход от русла к пойме – бровка берега – обычно устанавливается по линии появления растительности.

Островами называются покрытые наземной растительностью образования суши, высокие части которых находятся на уровне поймы, но разобщены с ней в течении большей части года или в течении круглого года речным потоком.

В русле крупной реки обычно присутствуют достаточно обширные скопления русловых наносов. При низких уровнях воды возвышенные части этих скоплений выходят на поверхность, образуя надводные русловые формы. Эти формы могут быть прижаты к берега или острову – побочни и пляжи, или располагаться изолированно, в центральной части русла – осередки. Со временем, по мере накопления наносов, эти русловые формы могут закрепляться растительностью. Осередки превращаются в острова, а побочни и пляжи присоединяются к пойменному массиву. Возможен и противоположный процесс – существующие русловые формы размываются и, после их исчезновения, начинается размыв берега поймы или острова.

Принципы идентификации основных морфологических элементов русла по топографическим данным, в соответствии с приведенными выше определениями, продемонстрированы на модельном фрагменте топографическом карты масштаба 1:25000, представленном на рисунке 2.1.



Условные обозначения: А – русло реки; Б – пойма; В – остров; 1 – бровка берега маркируется обрывом; 2 – бровка берега маркируется растительностью; 3 – прилегающая к берегу русловая форма (побочень); 4 – изолированная русловая форма – осередок; 5 – подводная отмель.

Рисунок 2.1 – Идентификация основных морфологических элементов русла реки по крупномасштабной топографической карте

Результаты проделанной работы представлены на рисунке 2.2. На нем показано положение бровки берега и конфигурация русловых форм р. Обь у города Барнаула в 1951, 1978 и 1998 г. отдельно для каждого года с наложением на современную ситуацию. При этом для каждого последующего года приведен также в бледных тонах вид русла в предыдущий год.

В 1951 году русловая ситуация на р. Обь у города Барнаула вообще, и на рассматриваемом участке в частности, отличалась от современного положения коренным образом. Русловое разветвление на верхней границе участка существовало, но основное русло реки в нем проходило у с. Бобровка, т.е. было прижато не к левой, а к правой стороне речной долины. Соответственно, протока Бобровская, питаемая из этого основного рукава, была гораздо более широкой и полноводной. Русло – в основном относительно прямолинейное. От разветвления и до железнодорожного моста существовала только одна, но зато весьма крупная и крутая излучина – Айдаровская. Эта излучина в тот момент уже достигла конечной стадии своего развития («крутая омеговидная» по классификации Чалова) за которой должно последовать ее спрямление [7]. Такое спрямление действительно произошло в скором времени, по данным [9] – в 1959 г.

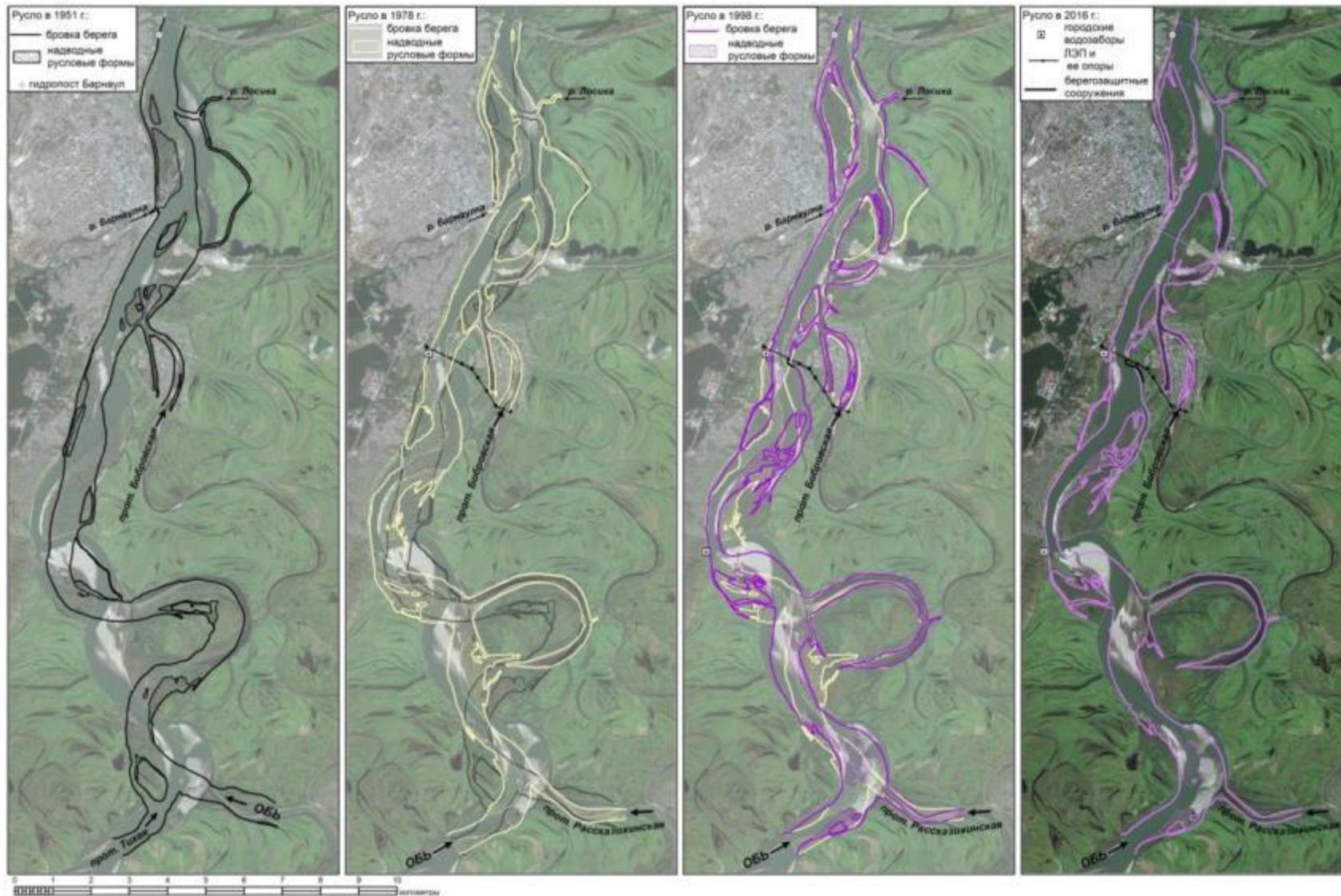


Рисунок 2.2 – Эволюция русла р. Обь у г. Барнаула с 1951 по 2016 г. Подложка – спутниковый снимок 07.09.2016 г.

Вместе с тем, уже тогда в русле присутствовали некоторые признаки (маркеры) будущего развития ситуации. Следует обратить внимание на надводные русловые формы на месте левобережного пойменного массива выше водозабора №1, у устья Бобровской протоки, а также на небольшой островок в створе нового автомобильного моста. То есть уже тогда обозначились места отложения наносов при их массовом перемещении по руслу.

Спрявление Айдаровской излучины путем размыва пойменного массива в её основании, высвободило и включило в речной поток значительные объемы наносов. Эти наносы, перемещаясь вниз по реке и откладываясь в различных местах, отклоняли речной поток от прямолинейного течения и вызывали значительные плановые деформации русла. К 1978 г. русло из прямолинейного превратилось в извилистое, меандрирующее.

Кроме того, основной поток в русловом разветвлении на верхней границе участка переместился из правого рукава в левый. Пока неясно связаны ли между собой спрявление излучины и смещение основного потока в разветвлении. Несомненно, однако, что такое смещение явилось еще одним источником поступления наносов в ходе углубления и расширения протоки Тихая.

Как видно из рисунка 2.2, к 1978 г. сформировалась та система свободных и вынужденных излучин, которая существует на рассматриваемом участке и сейчас. На ранней стадии развития таких излучин для них характерен процесс достаточно быстрого смещения вниз по течению с одновременным ростом крутизны, причем смещение обычно преобладает над ростом крутизны [7]. Это смещение, протекавшее в 1980-е годы, крайне неблагоприятно сказывалось на работе водозабора №1, а темпы размыва правого пойменного берега выше перехода ЛЭП достигали 90 м/год [10].

Угроза объектам хозяйственной инфраструктуры обусловила разработку и реализацию каскада различных инженерных мероприятий – от прокладки через тело вышележащего левобережного побочного подхода канала к водозабору [11], след этого канала просматривается в рельефе пойменного массива до сих пор, до сооружения на правом берегу системы берегозащитных и струенаправляющих сооружений [9]. Приходится, однако, констатировать, что все эти меры не смогли кардинально улучшить ситуацию, хотя при их проектировании использовались не только, в основном качественные, подходы русловедения [7, 14], но и методы физического моделирования [9].

Спустя еще 20 лет, к 1998 г., конфигурация русла уже достаточно приблизилась к современному виду. Окончательно сформировались остров Дрокин и левобережный пойменный массив выше водозабора №1. Масштабы русловых переформирований

значительно сократились. Отметим, кстати, что на ситуации 1998 г. хорошо просматривается процесс частичного спрямления излучины в сегменте 1, о котором уже говорилось выше. Также следует обратить внимание на процесс постепенной деградации протоки Бобровская, лишившейся питания из основного русла. Она постепенно заполняется наносами.

Наконец на оставшемся отрезке времени, около 20 лет, наблюдаемая в настоящее время русловая ситуация оформилась окончательно. Существенные перестройки формы русла в плане происходят лишь в верхней части участка, где идет развитие системы излучин (свободных и вынужденной). Однако масштабы этой перестройки гораздо менее значительны, чем в предыдущее двадцатилетие.

Подводя итог обсуждению представленных выше данных можно заключить, что русловой процесс протекает в целом неравномерно. За «вспышками» активности следуют периоды относительно спокойного его течения. В ходе активной фазы происходит изменение морфодинамического типа русла, как в данном случае оно из прямолинейного стало меандрирующим. Эта перестройка сопровождается наиболее масштабными и относительно быстрыми (катастрофическими) русловыми деформациями. После того, как новый тип русла сформирован, оно продолжает развиваться уже в более медленном темпе. Обе фазы могут быть достаточно продолжительными. Действительно, от момента спрямления излучины до окончательной стабилизации ситуации в конце 1990-х годов прошло около 40 лет.

Фаза относительно спокойного течения руслового процесса является наиболее благоприятной для отработки методов и средств его математического моделирования. Основные морфодинамические типы русла (по [9]) или руслового процесса (по [14]) уже достаточно хорошо изучены. Для каждого из таких типов известны основные стадии развития русла, общая направленность вертикальных и плановых русловых деформаций, локализации зон размыва берега и накопления наносов, эмпирические оценки скорости русловых деформаций и т.д. Все это позволяет достаточно быстро оценить адекватность получаемых результатов моделирования. Если на качественном уровне они будут противоречить известной схеме развития процесса, то говорить о количественной стороне дела уже бессмысленно.

### 3 Комплексная компьютерная модель течения и транспорта взвешенных и влекомых речных наносов

Для описания процессов переноса и осаждения наносов на участке р. Обь использована комплексная математическая модель на основе нестационарных трехмерных (3D) гидродинамических уравнений совместно с плановой (2DH) моделью транспорта русловых наносов. Гидродинамическая 3D-модель базируется на уравнениях Навье-Стокса, полученных в предположении гидростатического приближения. Коэффициенты турбулентного обмена рассчитываются по двухпараметрической ( $k$ - $\varepsilon$ )-модели турбулентности. Система определяющих уравнений имеет вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{xy} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_e \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right), \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -g \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_{xy} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_e \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right), \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} + w \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_k \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P' - \varepsilon, \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + w \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 \cdot P' - C_2 \cdot \varepsilon), \quad (3.5)$$

$$P' = \frac{\mu_T}{\rho} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right], \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + (w - w_s) \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{xy} \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{xy} \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial S}{\partial z} \right). \quad (3.7)$$

Здесь  $u, v, w$  - скорости вдоль координат  $x, y, z$  соответственно в предположении, что пространственная область не настолько большая, так чтобы можно было использовать декартову систему координат. Обычно полагается, что ось  $x$  ориентирована с запада на восток, ось  $y$  - с юга на север, ось  $z$  - снизу вверх.  $g$  - ускорение свободного падения,  $\xi$  - уровень свободной поверхности,  $\mu$  - коэффициенты (турбулентной) вязкости, причем

$$\mu_T = \rho \cdot C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad \mu_e = \mu_{mol} + \mu_T, \quad \mu_k = \frac{\mu_{mol}}{\sigma_{mol}} + \frac{\mu_T}{\sigma_k}, \quad \mu_\varepsilon = \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}, \quad k - \text{кинетическая энергия}$$

турбулентности,  $\varepsilon$  - скорость диссипации энергии турбулентности,  $\mu_{mol}$  - динамическая вязкость,  $D_z = \frac{\mu_T}{\rho \cdot \sigma_S}$  - коэффициент турбулентной диффузии,  $C_1, C_2, C_\mu, \sigma_{mol}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, \sigma_S$  - калибровочные константы модели турбулентности,  $\mu_{xy}$  - фоновая вязкость в горизонтальном направлении,  $f$  - параметр Кориолиса,  $S$  - массовая концентрация твердой фазы во взвешенном состоянии,  $\rho$  - плотность воды,  $w_s$  - скорость осаждения фракции,  $D_{xy}$  - фоновый коэффициент диффузии в горизонтальном направлении.

Граничные условия на поверхности воды:

$$\text{для компонент скорости в отсутствии ветра} - \frac{\partial u}{\partial z} = 0, \frac{\partial v}{\partial z} = 0, w = 0,$$

$$\text{для модели турбулентности в отсутствии ветра} - k = 0, \varepsilon = 0,$$

$$\text{для концентрации твердой фазы} - w_s S + D_{tz} \frac{\partial S}{\partial z} = 0.$$

Граничные условия на дне:

для компонент скорости на минимальном расстоянии до дна  $\Delta z_b$  -

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left( 1 + \frac{\Delta z_b}{2z_0} \right), \quad v = \frac{v_*}{\kappa} \ln \left( 1 + \frac{\Delta z_b}{2z_0} \right), \quad w = 0;$$

параметры в правых частях формул определяются с использованием логарифмического закона распределения скоростей в турбулентном потоке,

$$\text{для модели турбулентности на минимальном расстоянии до дна } \Delta z_b \quad -k = \frac{|u_*|^2}{\sqrt{C_\mu}},$$

$$\varepsilon = \frac{|u_*|^3}{\kappa z_0},$$

$$\text{для концентрации твердой фазы} - w_s S + D_{tz} \frac{\partial S}{\partial z} = E_b - D_b$$

где  $E_b$  - скорость эрозии фракции,  $D_b$  - скорость осаждения фракции. Величины  $E_b$  и  $D_b$  определяются соотношениями [15]. Обмен между взвешенными и влекомыми наносами моделируется согласно [16].

Граничные условия во входных сечениях:

Компоненты скорости рассчитываются исходя из заданного расхода, параметры турбулентности находятся из решения уравнений (3.4, 3.5) без учета адвекции, концентрации твердой фазы определяются их так называемым «равновесным» профилем, получаемого заданием нулевого градиента.

Граничные условия в выходных сечениях:

Задается уровень поверхности воды, параметры турбулентности также находятся из решения уравнений (3.4, 3.5) без учета адвекции, в уравнениях для концентрации твердой фазы пренебрегается диссипативными членами.

Начальные условия формируются путем решения квазистационарной задачи с граничными условиями, соответствующими начальному моменту времени.

#### 4 Натурные исследования

Из материалов предыдущего раздела видно, что реализация математической модели руслового процесса требует большого набора разнообразных, взаимосогласованных и актуальных натуральных данных. Эти данные необходимы для описания объекта моделирования, руслового потока и транспорта наносов, корректной формулировки начальных и граничных условий, а также для калибровки и верификации модели.

В ходе реализации данного Проекта были выполнены сбор, анализ, обобщение имеющихся гидрологических, гидрографических и топографических данных по исследуемому участку, полученных нами в ходе собственных натуральных исследований прошлых лет, выполнявшихся как в рамках бюджетных и договорных тематик, так и в инициативном порядке (рис. 4.1). Кроме того, в течение этого года в рамках данного Проекта, проведены дополнительные полевые топографические и гидрографические работы с целью уточнения и дополнения имеющихся данных, а также для сбора информации необходимой для калибровки и верификации построенной компьютерной модели (рис. 4.3).

##### 4.1 Исследования прошлых лет

На участке русла р. Обь в окрестности водозабора №1 от устья Ереснинской протоки до входа в протоку Дрокинскую с 2010 г. и по настоящее время авторами ведется мониторинг хода руслового процесса (рис. 4.1).

Ежегодно выполняемый комплекс работ на участке включает в себя русловую съемку (промеры глубин, съемку пространственного положения линии уреза воды), съемку бровки правого берега в его неукрепленной части, а также наблюдения за отметкой уровня воды на временных уровнемерных (водомерных) постах свайного типа (вод. постах), расположенных на правом берегу вблизи верхней границы участка и в створе перехода ЛЭП. Посты привязаны к единой с гидропостом Барнаул системе высот. Кроме того, начиная с 2013 г., в комплекс наблюдений включено измерение расходов воды с помощью акустического доплеровского профилографа-расходомера Sontek M9 River Surveyor Live. Частично результаты этих измерений приведены в таблице 1.2.

Весь комплекс проводится в течение одного дня, в один и тот же период времени (вторая половина сентября), и, соответственно, в однотипных гидрологических условиях осенней межени. Поскольку в осенне-зимний период в силу относительной малости расходов воды русловые переформирования практически не происходят, результаты наблюдений отражают состояние русла на конец каждого года.

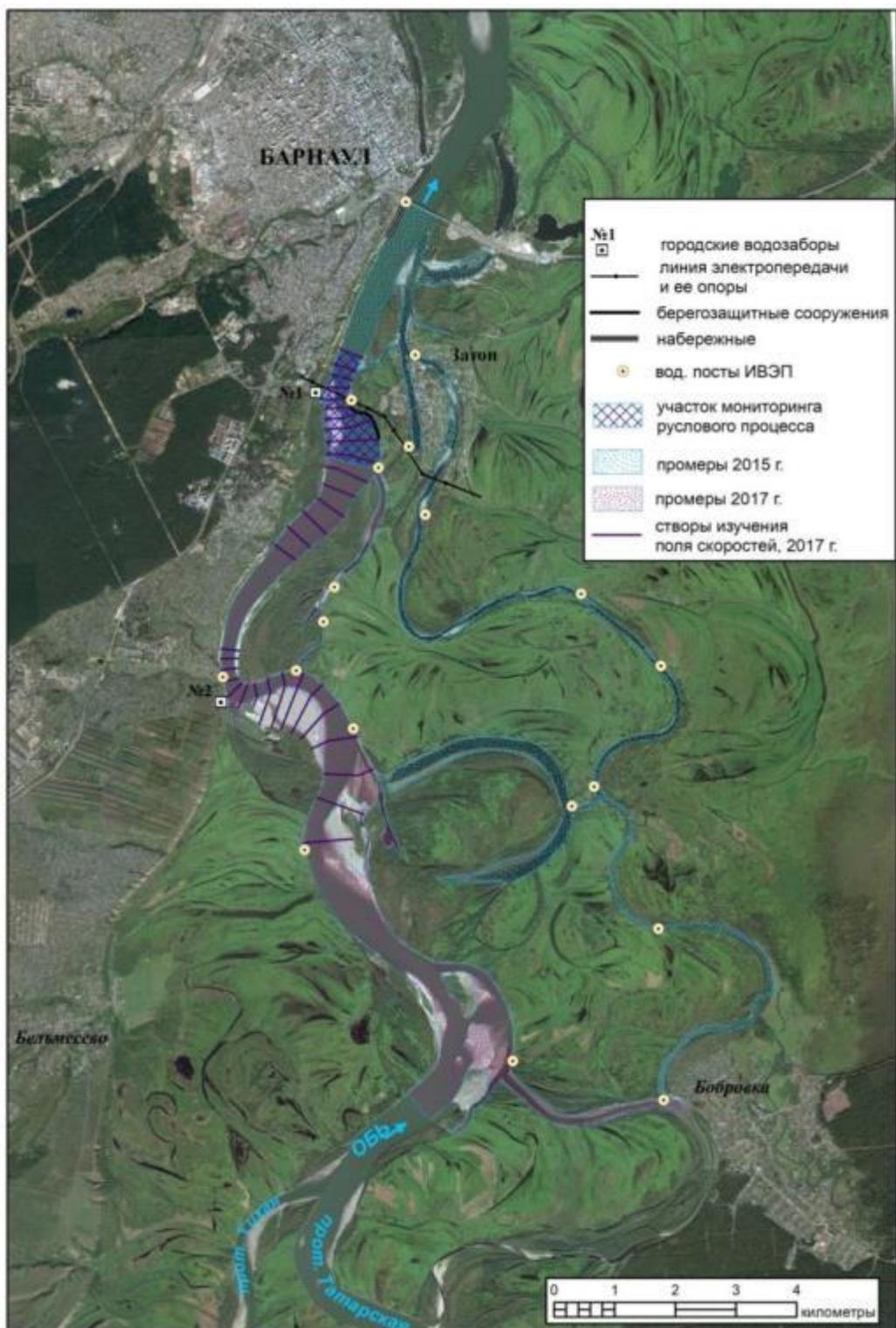


Рисунок 4.1 – Схема полевых работ на участке исследования в прошлые годы (2010 – 2018 гг.)

Кроме того, дважды в год, в условиях половодья и осенью проводится рекогносцировочное обследование участка: осмотр берегов и прилегающей территории пойменного массива, надводных русловых форм, а также осмотр и оценка состояния берегозащитных сооружений.

Безусловным недостатком этих наблюдений является то, что инструментальная съемка поверхности надводных русловых форм (левобережного побочня у водозабора, пляжевой полосы по правому берегу ниже створа перехода) не производилась. То есть отметки рельефа русла в его надводной части оставались неизвестными. Этот недостаток объясняется только одним обстоятельством – крайней ограниченностью финансовых ресурсов.

Результаты мониторинга за 2010-2016 гг. обобщены и опубликованы в [17]. В частности, было показано, что в течение 2013 г. в целом с участка мониторинга было изъято около 400 тыс. м<sup>3</sup> наносов. То есть результирующий расход наносов через нижний створ за активную фазу гидрологического цикла (период открытой воды) составил именно такую величину. Для общей оценки масштабов русловых переформирований на этом сравнительно небольшом отрезке и мощи речного потока укажем, что объем стандартного железнодорожного полувагона, используемого обычно для перевозки угля, составляет примерно 85 - 90 м<sup>3</sup>.

На рисунке 4.2 представлена итоговая картина изменений рельефа русла на участке мониторинга по данным русловых съемок 2017 – 2019 гг. Необходимо заметить, что поскольку, промеры глубин ограничивались линией уреза (высотные отметки в надводной части русла не снимались), а конфигурация надводных русловых форм изменяется, иногда довольно существенно, то сравнение вертикальных отметок дна возможно лишь в той области русла, которая является общей для съемок за данный и предыдущий год.

Из данных, приведенных на этом рисунке, видно, что даже не в самые многоводные годы (см. рис. 1.2, табл. 1.2) амплитуда вертикальных русловых деформаций может достигать довольно больших значений ( $\pm 4-5$  м). Следует отметить, что величины размыва/намыва 7-8 м локализованы в достаточно небольшой области участка. Это глубокая впадина (с глубинами до 25 м), расположенная у правого берега в створе перехода ЛЭП. Эта впадина является остатком бывшего подводного карьера, использовавшегося, вероятно, при строительстве линии.

Несмотря на разнообразие значений и пестроту пространственной картины в изменениях рельефа русла у водозабора №1 в последние два года можно отметить и общий момент. А именно, достаточно мощное накопление наносов у правого берега на верхней границе участка, а также ниже по течению – между створом перехода ЛЭП и входом в протоку Дрокинскую. В 2019 г. на верхней границе участка даже образовалась надводная аккумулятивная форма площадью около 0,45 га (рис. 4.2-б). Надо сказать, что такое явление наблюдалось впервые за всё время наших работ (с 2010 г).

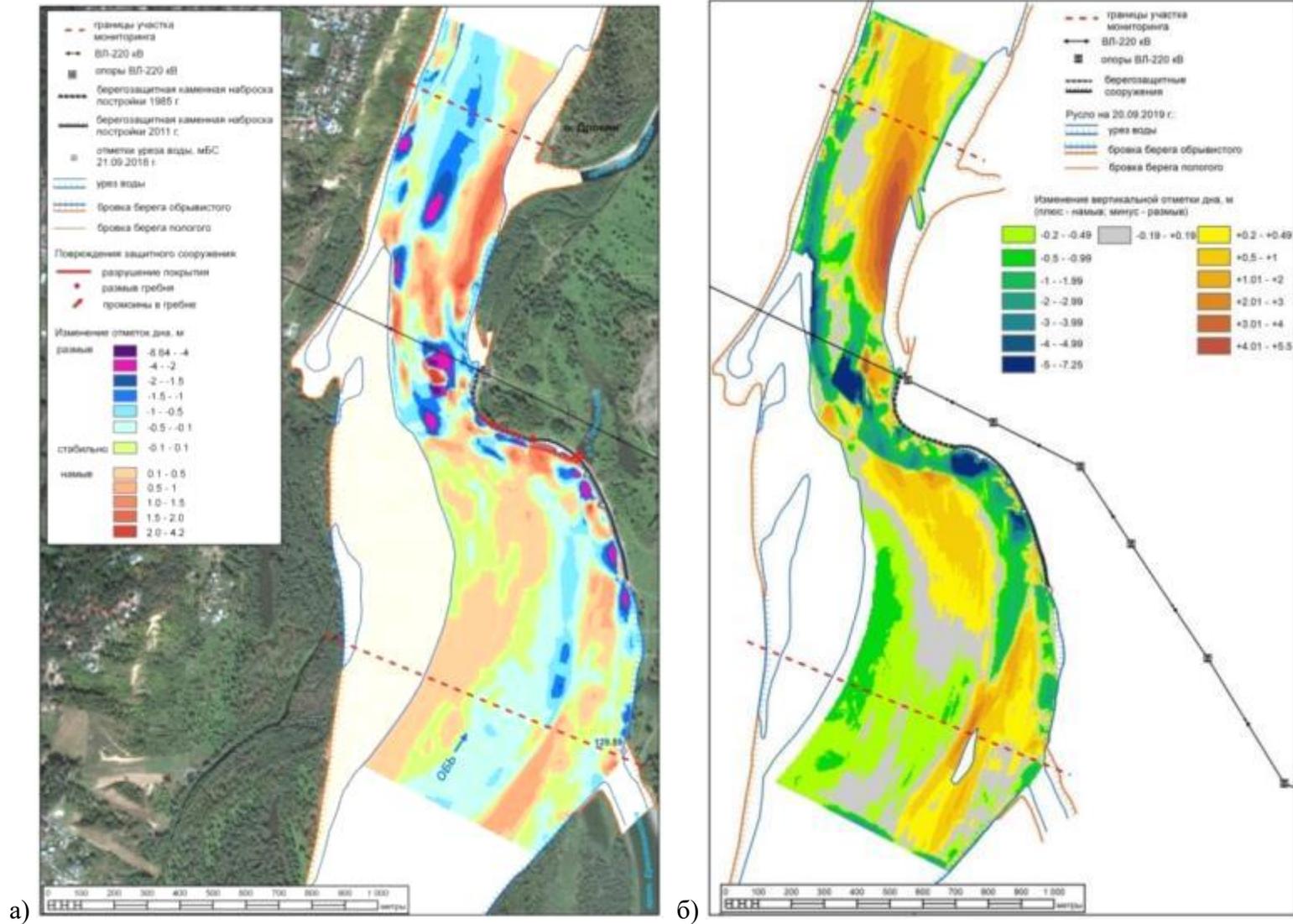


Рисунок 4.2 – Изменение отметок дна (размыв \ намыв) на участке мониторинга у водозабора №1

В 2015 – 2017 гг., в дополнение к уже существующим двум постам, была развернута сеть пунктов наблюдений за уровнем воды, как в основном русле реки, так и в правобережных протоках (рис. 4.1). Все созданные посты также были привязаны в единую с гидропостом Барнаул систему высот. Измерения на всех постах выполнялись не синхронно, но в течение одного-двух дней (серия наблюдений). В течение года проводилось несколько серий, приуроченных к характерным моментам гидрологического режима – нарастание половодья, пик половодья, спад половодья, межень. Наблюдения за уровнями воды были продолжены и в 2018 г.

Эти работы выполнялись в рамках госбюджетных исследований по развитию методов компьютерного моделирования прохождения половодья в руслах крупных рек со сложной геометрией и широкой поймой с целью обеспечения гидродинамических компьютерных моделей речного потока исходными данными и информацией для их калибровки и верификации.

С той же целью в 2015 и 2017 г. были выполнены гидрографические (промерные) работы в русле реки, а также в протоках (рис. 4.1). При этом информация об уровнях воды, полученная с развернутых постов, использовалась для согласования результатов промеров и приведения данных о рельефе русла к единой системе высот.

В 2017 г. нами были проведены натурные исследования поля скоростей течения в излучинах, расположенных у водозаборов №1 и №2, в различных гидрологических условиях (на пике половодья и на его спаде) (рис. 4.1). Они проводились для того чтобы, во-первых, пополнить общую копилку натуральных данных о структуре речного потока на изгибах русла, «объем которых невелик» [7], и, во-вторых, чтобы получить детальную информацию о параметрах течения для участков реки, критически важных в хозяйственном отношении. Измерения скоростей и направлений течения проводилось с помощью акустического доплеровского профилографа-расходомера Sontek M9 River Surveyor Live в 16 створах на каждом участке. Результаты этих работ представлены в [18]. Выполненные наблюдения показали, в частности, что на участке наиболее существенных повреждений берегозащитного сооружения у водозабора №1 (разрушение покрытия, локальные размывы и промоины в гребне банкета, см. рис. 4.2-а) имеет место значительное конвективное ускорение речного потока. На отрезке длиной около 400 метров скорость течения увеличивается примерно вдвое. Для условий пика половодья: с 0,5 – 0,6 до 1,2 – 1,4 м/с., на спаде половодья: с 0,8 до 1,3 – 1,5 м/с. Вместе с тем, на верхнем благополучном участке сооружения в условиях половодья происходит торможение потока. Скорость течения уменьшается с 0,7 до 0,5 – 0,6 м/с.

#### 4.2 Полевые работы 2019 г.

Схема полевых работ на участке исследования, выполненных в 2019 г. в рамках данного проекта представлена на рисунке 4.3.

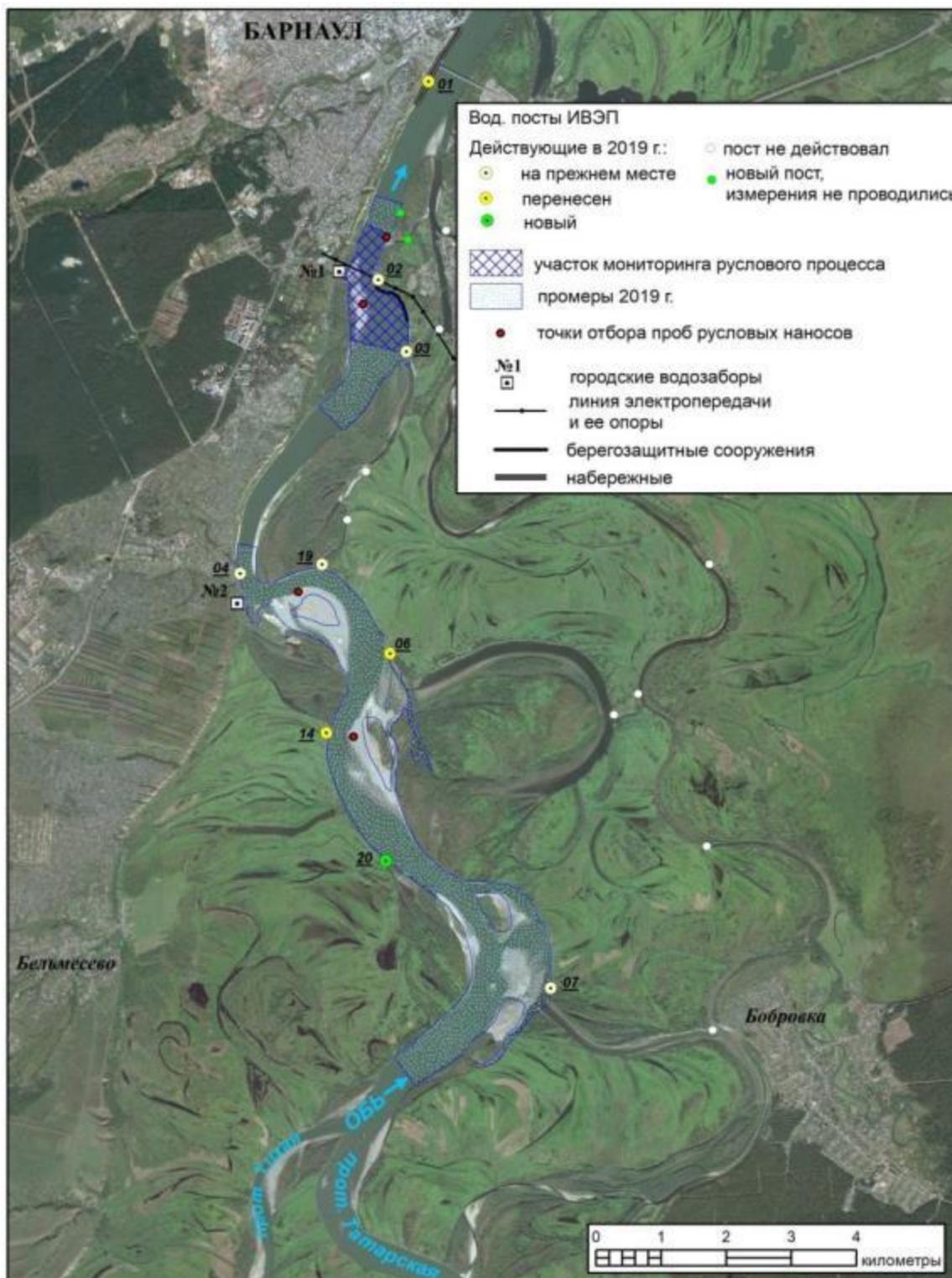


Рисунок 4.3 – Схема полевых работ на участке исследования в 2019 г.

Было выполнено общее рекогносцировочное обследование участка, в ходе которого уточнено современное положение бровки берега. Результаты этого обследования приводились в разделе 1.

Было продолжены наблюдения за уровнем воды на развернутой ранее системе водомерных постов, в пунктах, расположенных по руслу реки в пределах участка (рис. 4.3). В ходе этих работ часть постов пришлось перенести на новое место ввиду изменившейся обстановки. Кроме того, был устроен ряд новых постов с целью обеспечения промерных работ и более точного описания граничных условий разрабатываемой компьютерной модели.

Промерные работы этого года, во-первых охватили остававшийся неисследованным отрезок русла у верхней границы участка и во-вторых, позволили уточнить рельеф русла в тех зонах участка, где русловой процесс протекает наиболее активно (рис. 1.1., 4.1, 4.3). Гидрографические работы выполнялись с помощью смонтированного на надувной моторной лодке промерно-измерительного комплекса, оснащенного эхолотом и акустическим доплеровским профилографом-расходомером, который способен измерять и глубины, причем с большой точностью (рис. 4.4).



1 – излучатель эхолота Lowerance LMS-480; 2 – акустический доплеровский профилограф-расходомер Sontek M9 аппаратно-программного комплекса Sontek RiverSurveyor Live. На заднем плане – здание водозабора №1.

Рисунок 4.4 – Промерно-измерительный комплекс:

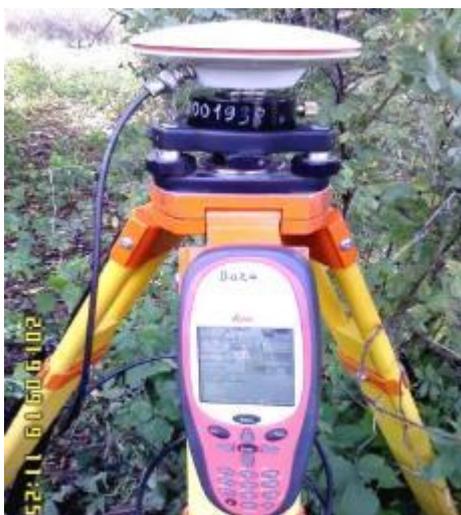
В ходе работ этого года был ликвидирован существенный недостаток предыдущих изысканий, а именно, выполнена инструментальная съемка рельефа надводных русловых форм – больших левобережных побочней у водозаборов №1 и №2, а также правобережной

пляжевой полосы, протянувшейся от створа перехода ЛЭП у водозабора №1 до середины острова Дрокин (рис. 4.5).



На заднем плане – земснаряд, расчищающий подходной канал к водозабору.  
Рисунок 4.5 – Топоъемка надводных правобережных русловых форм у водозабора №1.

Кроме того, была отработана обычная программа мониторинга руслового процесса на участке у водозабора №1, о которой уже упоминалось выше (рис. 4.6).



а) базовая станция GPS-системы Leica Sr-20 на репере



б) съемка пространственного положения бровки берега подвижным компонентом GPS-системы Leica Sr-20 («ровером»).

Рисунок 4.6 – Топоъемка участка правого берега у водозабора №1 с использованием геодезической GPS-системы Leica Sr-20

Для получения характеристик русловых наносов, необходимых для компьютерного моделирования, на участке исследований были отобраны и проанализированы их пробы. Пробы отбирались в условиях межени (начало октября) в четырех точках, рассредоточенных по протяжению участка, на надводных русловых формах из приурезовой полосы (рис. 4.3). Объем пробы – 0,25 л. Для получения обобщенной оценки все эти пробы смешивались в одну, из которой затем брались три повторные пробы равного веса. Эти три повторные пробы (приема) анализировались средствами полевой лаборатории Литвинова (ПЛЛ-9) на гранулометрический состав и угол естественного откоса. Результаты анализа представлены на рисунке 4.7 и в таблице 4.1.

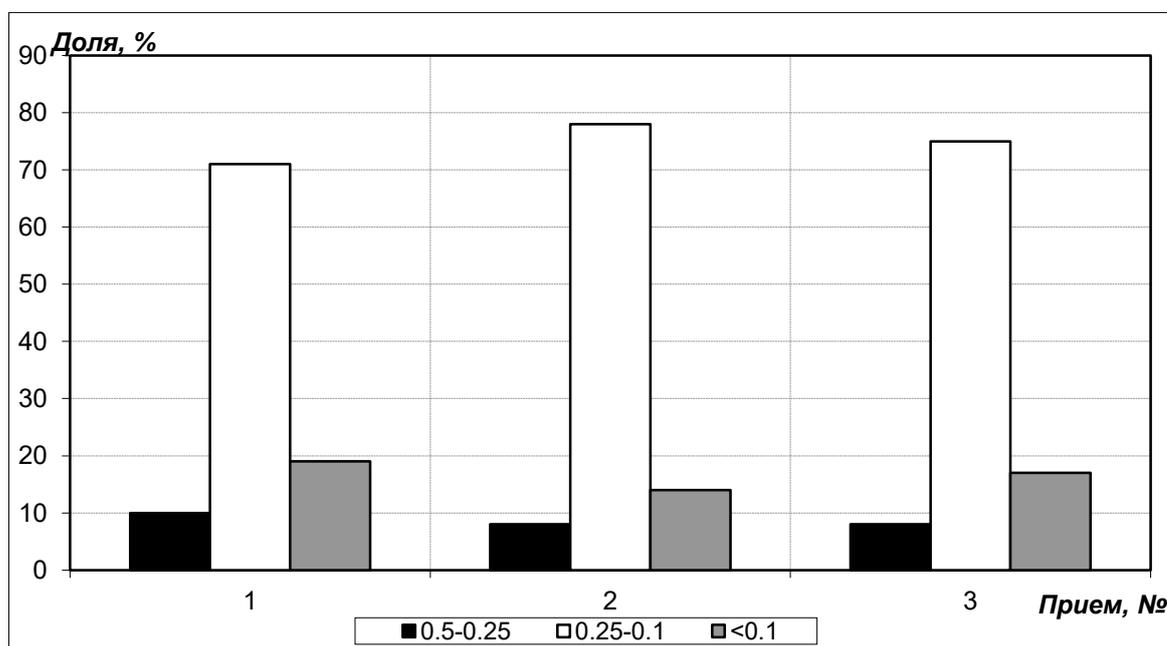


Рисунок 4.7 – Результаты анализа на гранулометрический состав проб русловых наносов, отобранных на участке исследований

Таблица 4.1 – Результаты определения угла естественного откоса ( $\alpha$ ) проб русловых наносов, отобранных на участке исследований

Прием, №	Засыпано, мм	Высота, мм	Заложение, мм	$\text{tg}\alpha$	$\alpha^\circ$
1	60	55	74	0,743	36,6
2	63	55	74	0,743	36,6
3	61	55	75	0,733	36,2

Результаты обработки проб показывают, что русловые наносы на участке можно характеризовать как песок мелкий, хорошо отсортированный.

## 5 Компьютерное моделирование

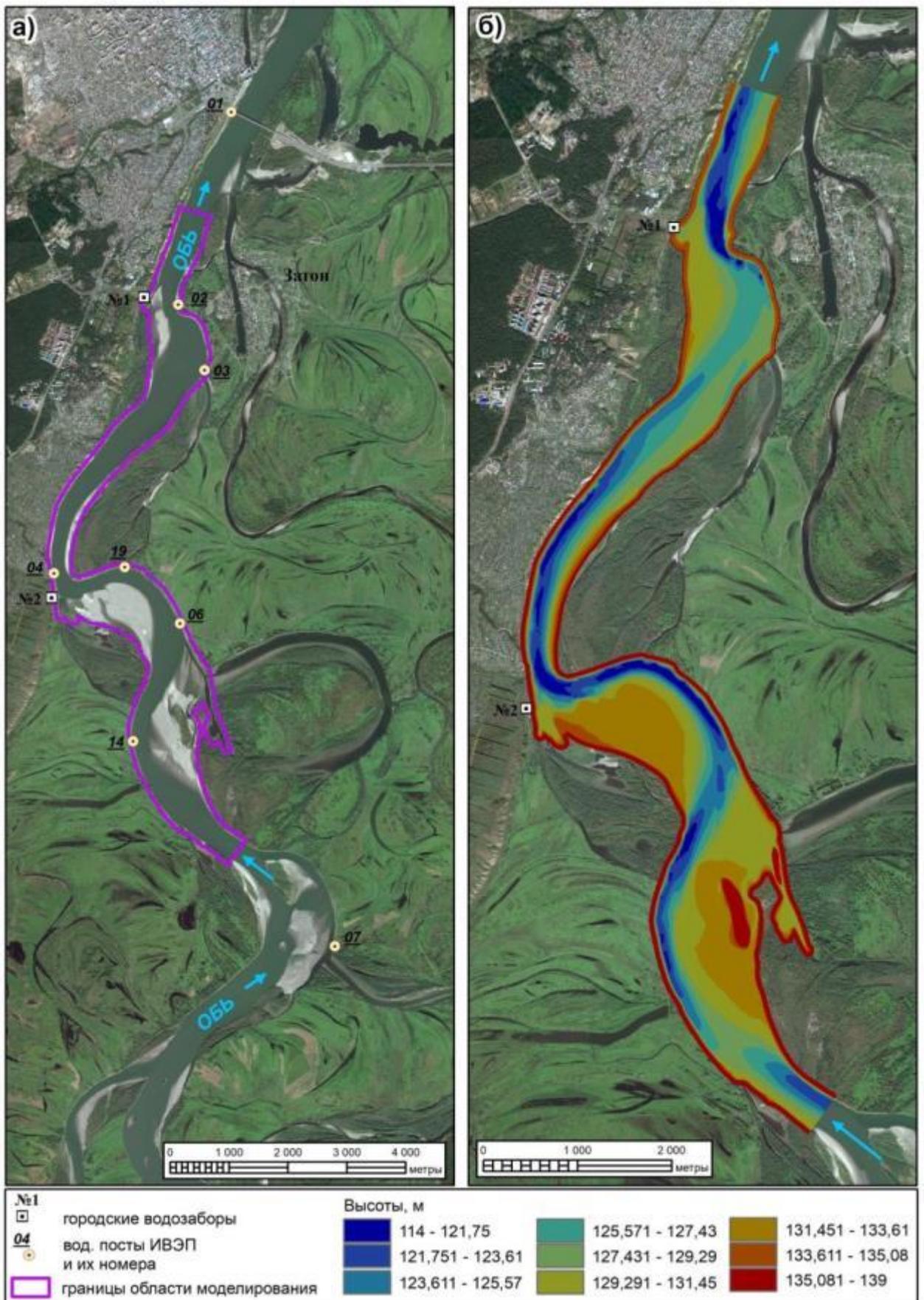
### 5.1 Исходные данные

Первая задача, которую необходимо решить при компьютерном моделировании, - это выбор расчетной области. В нашем случае, верхняя и нижняя границы этой области были сдвинуты относительно первоначально принятых границ исследуемого участка русла (рис. 5.1-а). Это было сделано по следующим причинам.

Измерить точно в натуральных условиях полный расход наносов (донных и взвешенных) через поперечное сечение реки, тем более крупной, практически невозможно. Поэтому, при моделировании на верхней границе приходится ставить граничное условие насыщенного потока, а именно, расход наносов равен теоретической емкости потока. То есть поток движется через створ без размыва и аккумуляции. Для мелководных (перекатных) участков такое условие не выполняется [19]. Рекогносцировочные и промерные работы этого года показали, что в окрестности верхней границе участка, на выходе из разветвления находится перекаат, где происходит интенсивное отложение наносов. Кроме того, результаты промеров этого участка пока нельзя адекватно перевести в общую систему высот, поскольку выше по течению отсутствует водомерный пост, и, следовательно, уклон водной поверхности остается неизвестным. Поэтому верхняя граница расчетной области (входной створ) была передвинута вниз по течению на 4,4 км, в точку сопряжения двух излучин, где как раз имеется плёсовая лощина (рис. 5.1-а).

В математических моделях речного потока во входной створе задается расход воды, а в выходном створе – отметка ее уровня [19]. В нашем случае, для получения такой отметки на нижней границе участка (у нового автомобильного моста) пришлось бы строить линию уклона водной поверхности между нашим постом 01 и гидростом Барнаул, расположенным в 5,5 км ниже по течению. Точность такого построения существенно возрастет, если сдвинуть нижнюю границу вверх по течению, на участок между нашими постами 01 и 02 (рис. 5.1-а). К тому же, это позволяет избежать трудностей, связанных с учетом в модели достаточно сложной конфигурации русла в районе острова Помазкин и устья Бобровской протоки.

Что касается боковых границ расчетной области, то рельеф пойменного массива за исключением пространственного положения и высотных отметок бровки берега остается для нас неизвестным. Получить такую информацию можно с топографических планов и карт масштаба 1:2000, 1:5000, однако они нам пока недоступны. Проведение же топосъемки такой обширной территории выходит далеко за рамки данного Проекта.



а) границы расчетной области; б) цифровая модель рельефа  
 Рисунок 5.1 – Границы расчетной области и цифровая модель рельефа для компьютерного моделирования руслового процесса на участке исследований

В силу этих причин боковые границы расчетной области искусственно проложены вдоль бровки берега, в пятидесяти метрах от неё. Причем высотные отметки этих границ приняты такими, чтобы гарантировать их незатопляемость.

Цифровая модель рельефа участка речной долины в выбранной расчетной области (русла, берегового склона и прилегающей к нему территории суши), представленная на рисунке 5.1-б, строилась исключительно на основе собственных данных промеров и съемок. Пойменные протоки и старицы при этом искусственно перекрывались. Высотные отметки бровки берега, в тех местах, где они не были известны, принимались на три метра выше меженного уровня воды в данном месте. Соответственно отметка боковой границы расчетной области подымалась выше еще на два метра. В целом, можно сказать, что прилегающая к руслу по обоим его берегам территория моделируется двумя плоскостями, которые постепенно понижаются вниз по течению и имеют наклон от боковой границы области к бровке берега. Кроме того, поскольку промерные работы выполнялись в разное время, а подводный рельеф русла постоянно изменялся, особенно на мелководных (перекатных) участках, то при стыковке этих данных между собой приходилось делать определенные осреднения и допущения.

Таким образом, можно сказать, что построенная цифровая модель не претендует на абсолютную точность и актуальность, но, вместе с тем, отражает основные черты морфологии русла.

Поскольку целью исследований является моделирование руслового процесса в пределах всей активной фазы гидрологического цикла, т.е. от вскрытия реки до наступления осенне-зимней межени, то следующей задачей в плане подготовки исходных данных является формулировка адекватного сценария гидрологического режима.

Сценарий должен содержать значения расхода воды во входном створе и отметки уровня в выходном створе расчетной области в заданные моменты времени. Кроме того, он должен учитывать ограничения, налагаемые цифровой моделью рельефа, а именно, обеспечивать незатопление поймы в период половодья. То, что эта ситуация вполне реальна, свидетельствуют гидрологические условия нынешнего года. В ходе половодья на исследуемом участке пойма не затопилась вовсе, вода лишь достигала бровки берега (см., например, рис. 1.9). По нашим наблюдениям перелив воды через бровку берега и массовое затопление поймы на участке начинается при расходах воды около  $4500 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Модельный гидрологический сценарий представлен в таблице 5.1., а на рисунке 5.2 указаны отметки уровня воды на г\п Барнаул, соответствующие этому сценарию, в сравнении с наблюдавшейся там динамикой уровня за 2017 – 2019 гг. Укажем, что отметка уровня для выхода воды на пойму для г\п Барнаул равна 133,09 м [3].

Таблица 5.1 – Модельный сценарий активной фазы гидрологического цикла р. Обь на участке исследования

Дата	Время (мест.), час:мин	Расход воды во входном створе, м <sup>3</sup> /с	Отметка уровня воды в выходном створе, м абс
18 апреля	08:00	2311	131,17
01 июня		3949	133,15
05 июня		4434	133,50
08 июня		4267	133,43
27 июня		4127	133,38
21 июля		2311	131,17
10 сентября		1089	129,35
10 октября		857	128,86

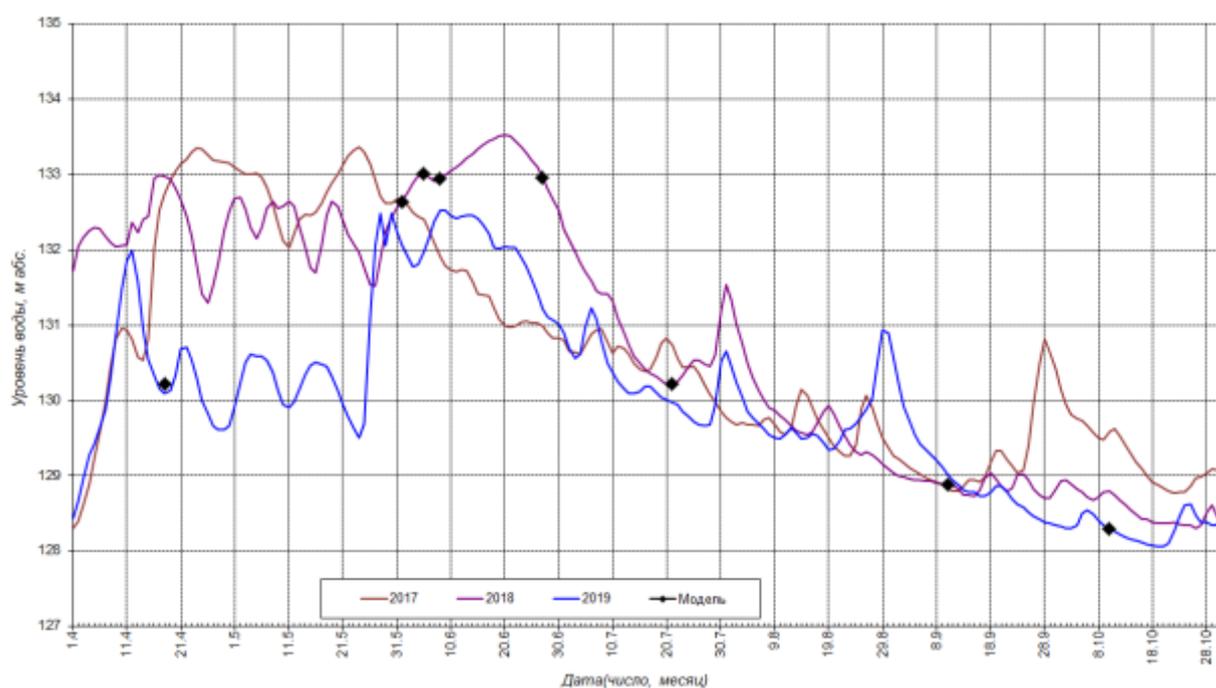


Рисунок 5.2 – Динамика уровня воды на г\п Барнаул в модельном сценарии и за 2017 – 2019 гг.

Для построения модельного сценария использовались в основном данные наших наблюдений за расходами и уровнями воды в 2018 г. Значения за 10 октября взяты из наблюдений в 2019 г. Начальной точкой сценария принято 18 апреля. Это та дата, к которой, по нашим наблюдениям последнего десятилетия, река всегда уже очищалась ото льда. Среднемноголетний расход на эту дату в створе г\п Барнаул, по данным Росгидромета, составляет 2318 м<sup>3</sup>/с [3]. Как показывают наши исследования, при таком значении расхода воды в основном русле течением в пойменных протоках можно пренебречь [2]. Следовательно, по участку проходит тот же расход воды, что и в створе гидропоста. Предполагая однозначность связи между расходом и уровнем воды, примем

для 18 апреля значения, наблюдавшиеся 21 июля 2018 г., весьма близкие по расходу воды ( $2311 \text{ м}^3/\text{с}$ , среднегодовое для 18 апреля -  $2318 \text{ м}^3/\text{с}$ ).

Поскольку в [3] приводятся данные об уровне воды на г\п Барнаул только по первому из двух сроков наблюдений (08:00 местного времени), то и значения гидрологических параметров в модельном сценарии будем относить к этому же часу.

Из таблицы 5.1. и рисунка 5.2 хорошо видно, что гидрологические условия модельного режима таковы, что вода не должна выходить за бровки берегов.

Для моделирования вертикальных и плановых деформаций русла необходимо знать характеристики материала, слагающего дно и берега, а также его исходный запас на дне. Современные математические модели позволяют достаточно детальное описание этих факторов руслового процесса, включая, например, армирующее влияние пойменной растительности на устойчивость берегового склона [20]. Однако получение соответствующих натуральных данных требует весьма значительных затрат ресурсов и времени. Поэтому, в модели предполагается, что весь участок речной долины в расчетной области сложен однородным материалом – песком с крупностью  $0,25 \text{ мм}$ . Толщина донного слоя русловых наносов равна  $5 \text{ м}$ . В принципе, это предположение не противоречит действительности, поскольку и пойма и русловые формы формируются из того материала, что переносится рекой [21]. Это, кстати, достаточно хорошо продемонстрировано материалами, представленными в разделе 2 (см. рис. 2.2).

Кроме того, на данном этапе исследований, решено было не учитывать в модели влияние берегозащитных сооружений. То есть соответствующие участки считались неукрепленными. Это было сделано с целью изучения возможностей модели воспроизводить размыв берегового склона.

## 5.2 Численная реализация модели

Моделирование выполнялось с применением специальной версии пакета с открытым исходным кодом Delft3D [22], реализующей комплексную компьютерную модель течения и транспорта русловых наносов на основе уравнений (3.1)-(3.7).

Расчеты выполнялись на регулярной пространственной сетке  $352 \times 41 \times 5$ , построенной с учетом цифровой модели рельефа исследуемой области (рис. 5.3). Выполнялся также расчет с использованием 2DH модели сетке  $703 \times 81$ .

Расчет транспорта наносов, изменение во времени расхода и уровня поверхности воды привел к необходимости ограничить шаг по времени. Так для 3D модели он составил  $12 \text{ с}$ , а для 2DH модели –  $15 \text{ с}$ . Физическое время вычислений на настольном компьютере с процессором Intel i5 4790 составило  $70 \text{ часов}$  для 3D модели и  $84 \text{ часа}$  при использовании

2DH модели. Меньшее время расчета по 3D модели является дополнительным свидетельством необходимости ее использования при расчете транспорта наносов.

Слишком упрощенный подход 2DH модели привел к резкому увеличению внутренних итераций по нелинейности численного алгоритма. В то же время, тестовый расчет по двумерной модели без учета транспорта наносов показал вполне адекватные результаты, а время вычислений составило 27 часов.

В ходе расчетов осуществлялся промежуточный вывод информации для определенных отметок времени, а именно на 00:00 часов 02 июня, 06 июня, 28 июня, 13 июля, 03 августа. Эта информация позволяет оценить состояние объекта в характерные моменты модельного гидрологического режима: половодье, спад половодья. Окончательный результат получен на 00:00 часов 11 октября.

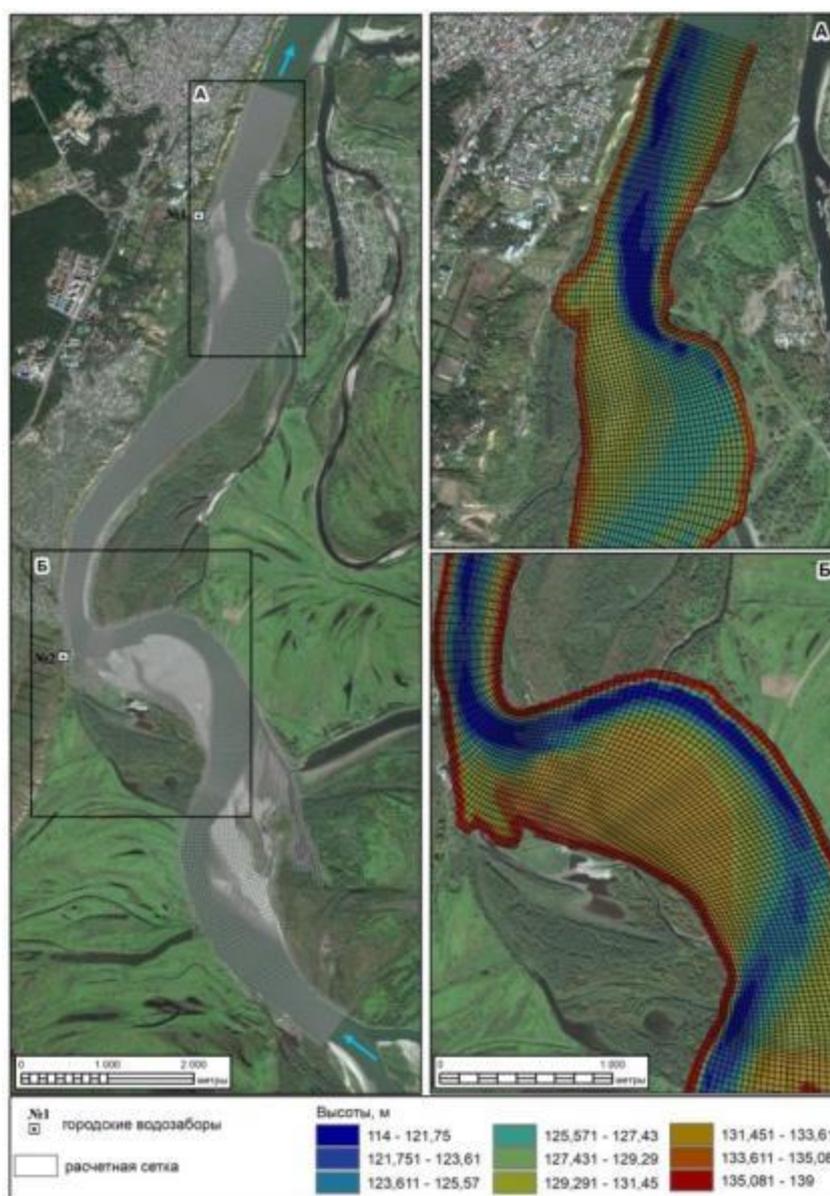


Рисунок 5.3 – Расчетная пространственная сетка для компьютерного моделирования руслового процесса на исследуемом участке

## 6 Результаты моделирование и обсуждение

Разработанная компьютерная модель воспроизводит чисто гидродинамические параметры руслового потока (уровни воды, глубины, поле скоростей) вполне удовлетворительно. На рисунке 6.1 представлено сравнение расчетного поля скоростей с результатами натуральных наблюдений, выполненных в достаточно близких условиях [18].

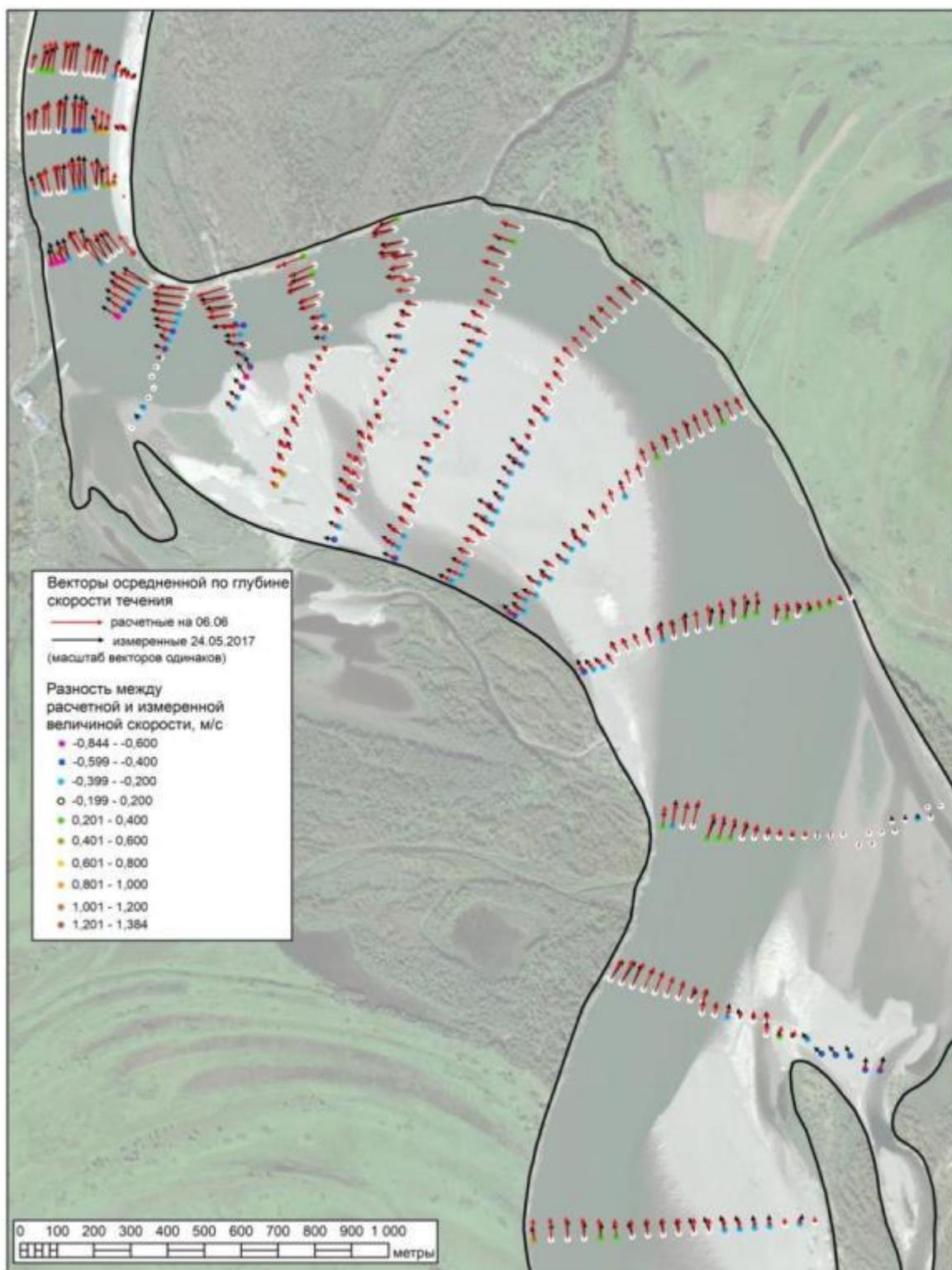
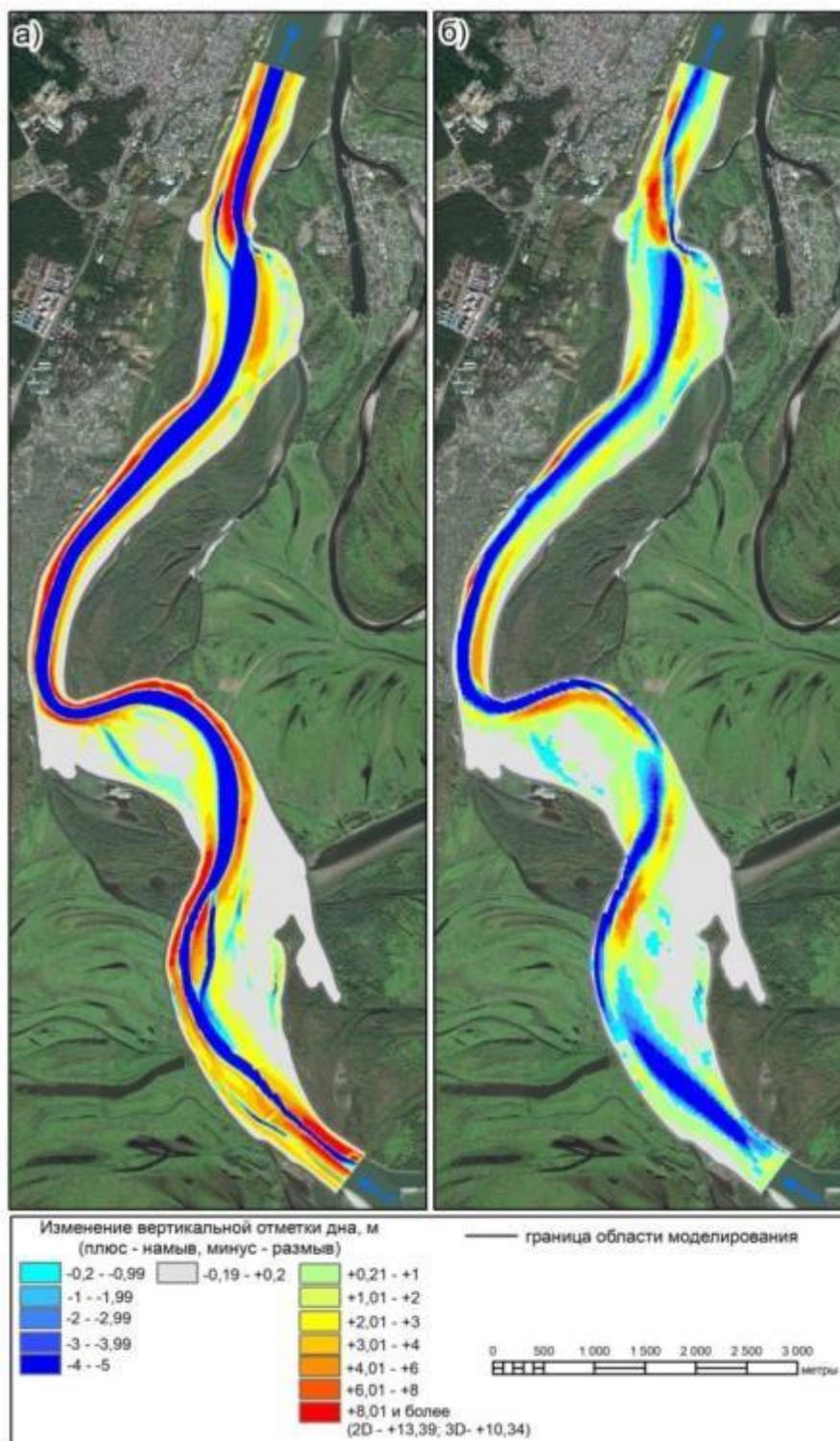


Рисунок 6.1 – Расчетное поле осредненной по глубине скорости течения в сопоставлении с натурными данными. Расходы воды: расчет – 4378, натура – 4250 – 4320 м<sup>3</sup>/с

Поскольку целью Проекта является моделирование русловых деформаций (плановых и вертикальных), то сосредоточимся далее на обсуждении именно этого аспекта полученных результатов.

На рисунке 6.2 приведены картины итоговых изменений рельефа в расчетной области, полученные при реализации модели в двухмерной (осредненной по глубине) постановке - 2D и трехмерной постановке – 3D.



а) 2D-модель; б) 3D-модель

Рисунок 6.2 – Расчетные итоговые (на 11.10) изменения рельефа в расчетной области

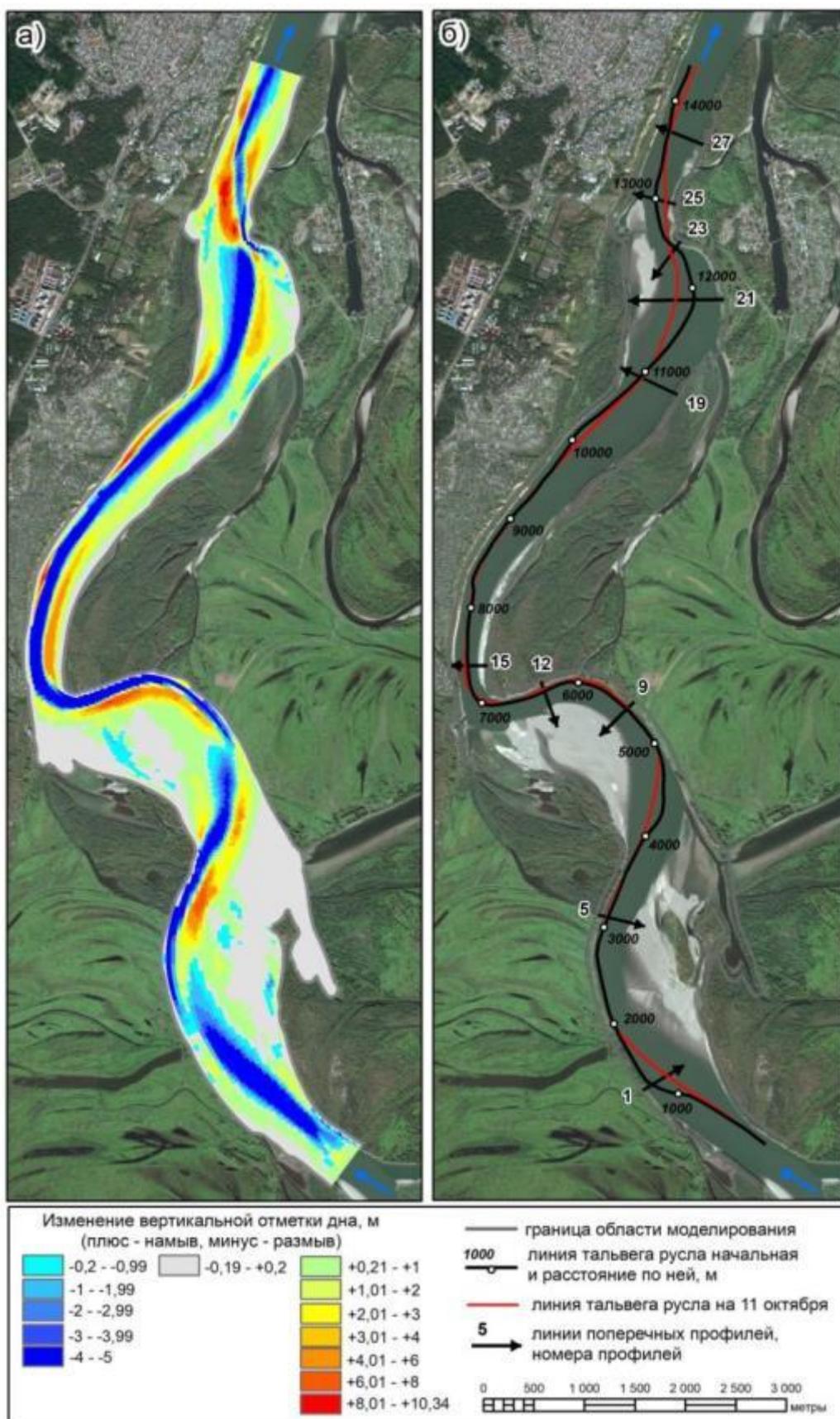
Как видно из рисунка 6.2 осредненная по глубине компьютерная модель дает совершенно нереальную картину русловых деформаций, особенно плановых. Там где должен происходить размыв берегов (в нижних крыльях свободных излучин, в верхних крыльях вынужденных излучин) наблюдается мощная аккумуляция наносов. В этом легко убедиться, если сравнить результат расчета (рис. 6.2-а) с картинками, приведенными на рисунках 1.5, 1.6. Впрочем, в результатах двухмерного моделирования просматриваются и «положительные» моменты. Например, образование протока, идущего через левобережный побочень к ковшу водозабора №1, чего в действительности, конечно же, не наблюдается. В связи с этим возникает вопрос. А не пользовались ли разработчики инженерных мероприятий для водозабора №1 именно таким подходом для обоснования предлагаемых решений.

С другой стороны, результаты 3D – моделирования дают картину вполне адекватную действительности (рис. 6.2-б). В нижних крыльях свободных излучин и в верхнем крыле вынужденной излучины у водозабора №2 наблюдается значительный размыв, в то же время, на противоположном выпуклом берегу происходит мощное накопление наносов. Именно это накопление вынуждает речной поток все отклоняться к противоположному берегу и размывать его. Материал, изъятый с берегового откоса верхнего крыла вынужденной излучины у водозабора №2, затем откладывается за поворот правого берега, причем масштабы этого отложения постепенно уменьшаются вниз по течению. И это явление соответствует действительности, оно хорошо просматривается на рисунках 1.1 и 1.6. У водозабора №1 размывается правый берег в верхнем крыле вынужденной излучины, оставленный нами неукрепленным (см. рис. 1.9, 4.2). Так же как и в природе имеет место накопление наносов у правого берега ниже створа перехода ЛЭП, а также в районе устья протоки Ереснинской (см. рис. 1.10, 4.2, 4.5).

Для того чтобы более детально изучить результаты трехмерного моделирования рассмотрим изменения рельефа расчетной области по набору характерных линий, проложенных вдоль и поперек русла, показанных на рисунке 6.3.

Продольная линия проложена по тальвегу исходного русла, то есть проходит через точки с наиболее низкими отметками. Для удобства обсуждения вдоль этой линии проставлены отметки расстояния по ней от начальной точки. Изменения рельефа дна вдоль линии исходного тальвега в процессе моделирования представлены на рисунке 6.4. Итоговая расчетная плановая конфигурация тальвега русла показана на рисунке 6.3-б.

Поперечные линии (профили) выбирались в наиболее характерных местах изменения рельефа. Стрелка указывает направление отсчета расстояния по профилю. Соответствующие результаты расчетов приведены на рисунках 6.5 – 6.10.



а) итоговые изменения рельефа по 3D-модели  
 б) характерные линии, их дислокация и ссылочные номера  
 Рисунок 6.3 – Расчетные итоговые (на 11.10) изменения рельефа в расчетной области и характерные линии для анализа этих изменений

Как видно из представленных данных, плановое положение линии тальвега русла в верхней половине участка изменилось незначительно (см. рис. 6.3-б), что по наших наблюдений последних трех лет соответствует действительности. А вот у водозабора №1 смещение линии тальвега достаточно сильное, а именно, произошло её заметное сглаживание. Этого эффекта, к сожалению, наши натурные наблюдения не показывают [17].

Если рассматривать изменения рельефа по длине русла, то из рисунка 6.4 видно, что в ходе модельного периода происходило углубление плёсовых лощин и отложение наносов на нижележащем перекате. В принципе, эти процессы наблюдаются в натуре, но вот их масштабы представляются нам несколько завышенными. Например, в плёсовой лощине, пролегающей вдоль левого берега между водозабором №2 и №1, весь донный слой наносов заданной толщины (5 м) был полностью размыт. Соответственно на нижележащем перекате имела место массовая аккумуляция этого материала. Возможно, в действительности, на дне плёсовых лощин нет такого запаса материала, а оно выстлано трудноразмываемым грунтом.

Обратившись к изменениям рельефа по профилям, можно сказать, что в целом расчеты дали картину, качественно очень хорошо совпадающую с действительностью.

Например, в районе профиля 1 берег стабилен, а у профиля он размывается и отступает (см. рис. 6.5 и 1.5). Правда величина отступления бровки за год в модели примерно равна той, что наблюдается за два года в действительности. Однако надо принять во внимание, что в модели береговой склон состоит исключительно из несвязного материала (песка), влияние других факторов, повышающих его устойчивость к размыву (растительность, глинистые включения и т.п.) не учитывалось.

Также модель правильно отражает факт размыва правого берега в смежных крыльях излучин у водозабора №2 и накопление наносов на левобережном побочке (рис. 6.6). Хотя опять же величина этих изменений больше чем они есть в действительности.

Ниже водозабора №2 у правого берега наблюдается накопление наносов, что и отражено в результатах моделирования (профиль 15, рис. 6.7).

В окрестности водозабора №1, как уже отмечено выше, ситуация с соответствием результатов расчета данным наблюдений менее благоприятна. Однако и здесь можно указать на факты правильного отражения в модели некоторых важных проявлений хода руслового процесса. Так результаты моделирования показывают размыв и отступление правого берега в верхнем крыле вынужденной излучины (профиль 23, рис. 6.9), а также явление заносимости подходного канала к водозабору (профиль 25, рис. 6.9).

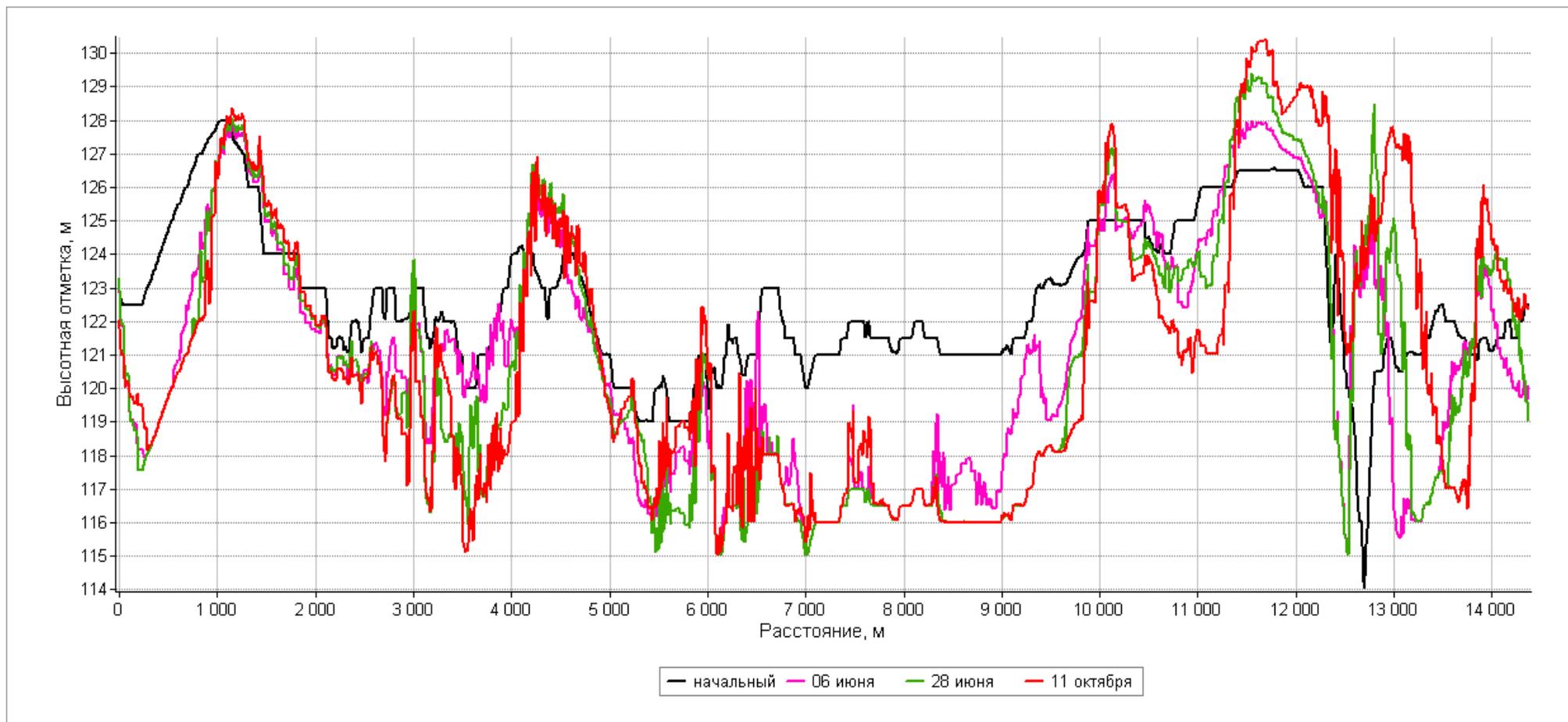


Рисунок 6.4 – Рельефа дна по линии тальвега исходного русла в различные моменты модельного периода

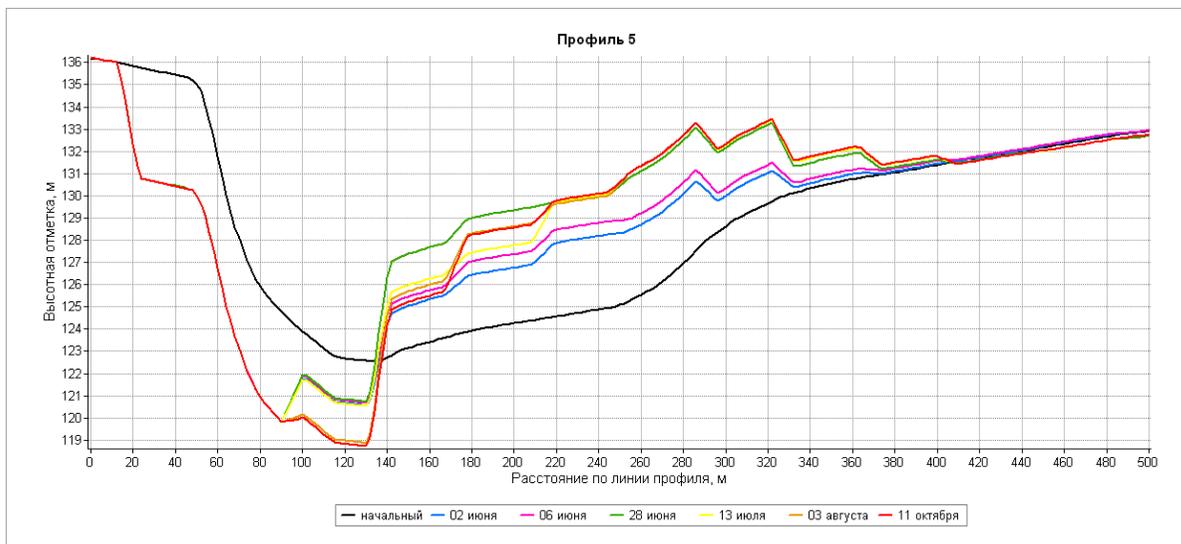
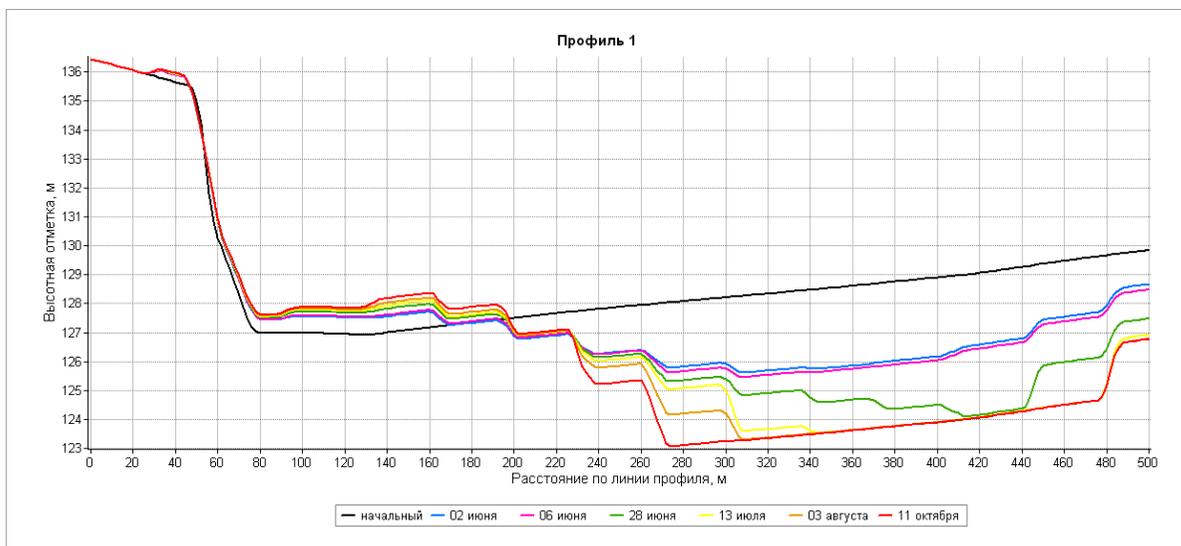


Рисунок 6.5 – Рельефа дна по линии профилей 1, 5 (рис. 6.3) в различные моменты модельного периода

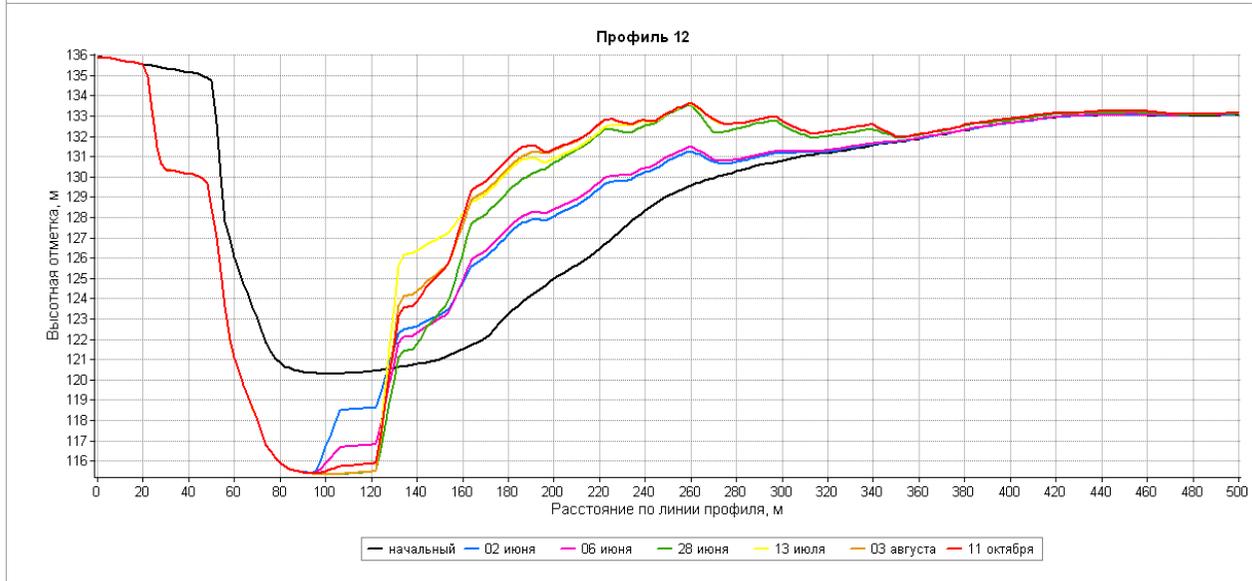
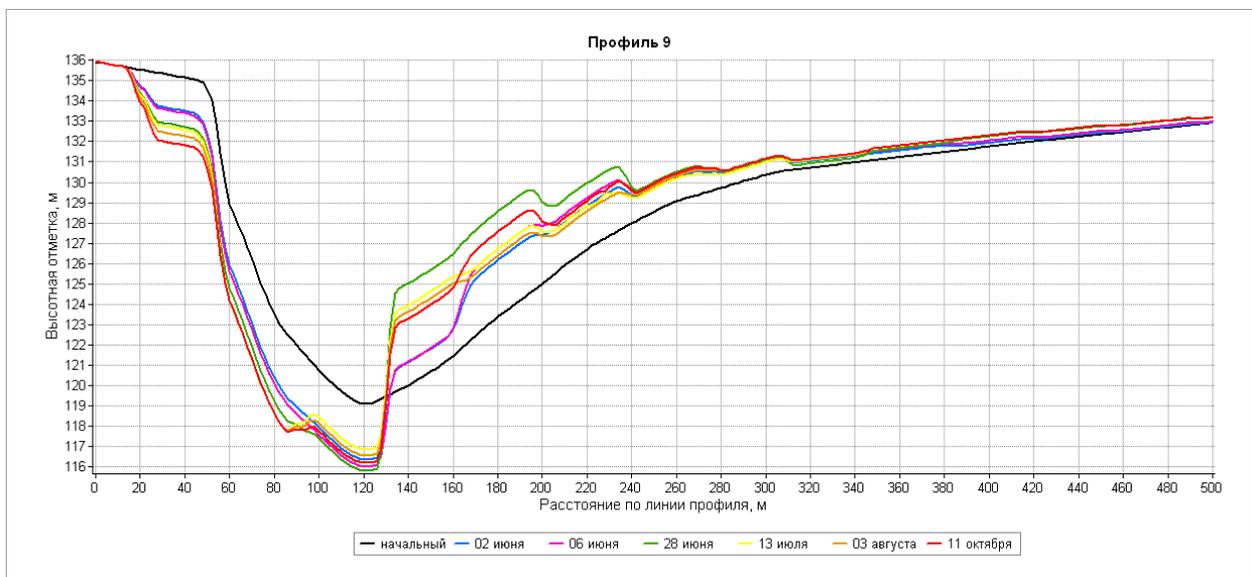


Рисунок 6.6 – Рельефа дна по линии профилей 9, 12 (рис. 6.3) в различные моменты модельного периода

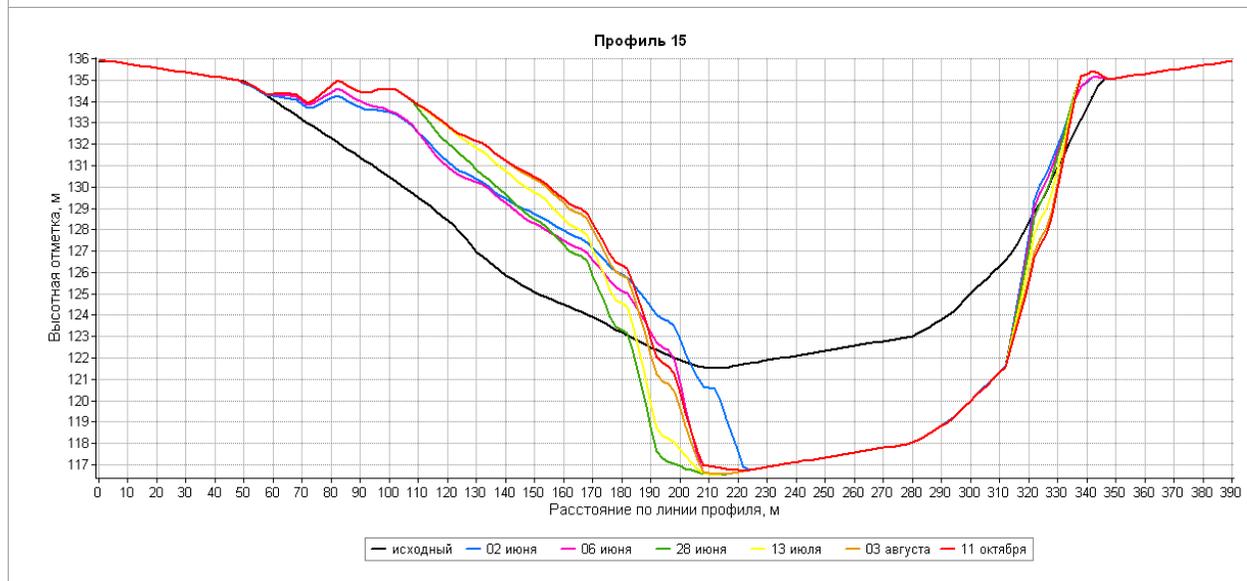
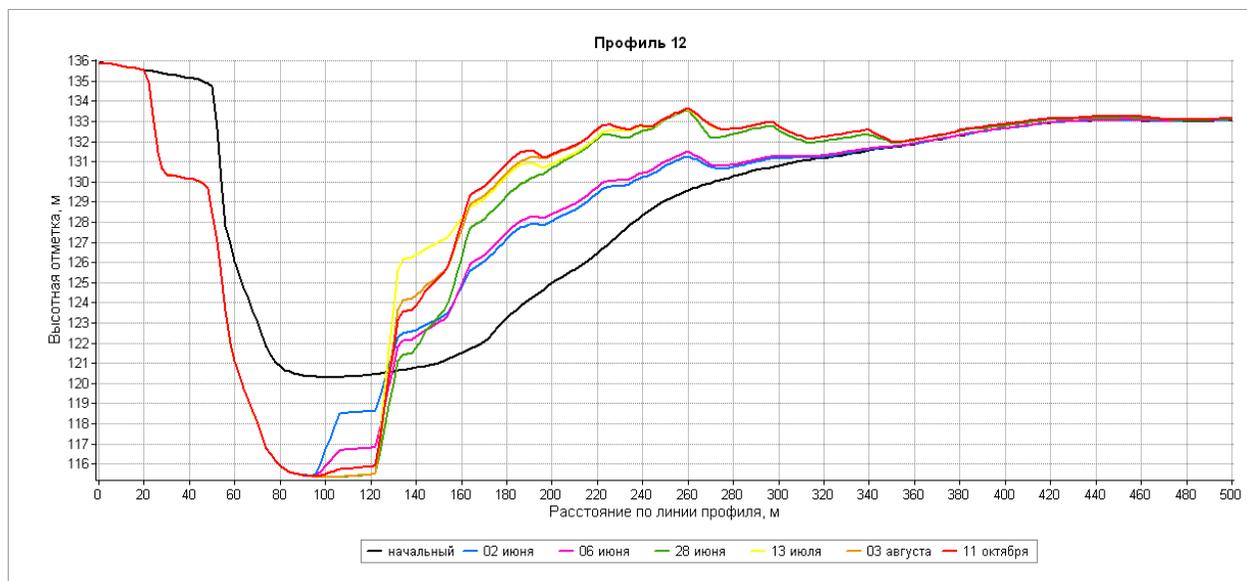


Рисунок 6.7 – Рельефа дна по линии профилей 12, 15 (рис. 6.3) в различные моменты модельного периода

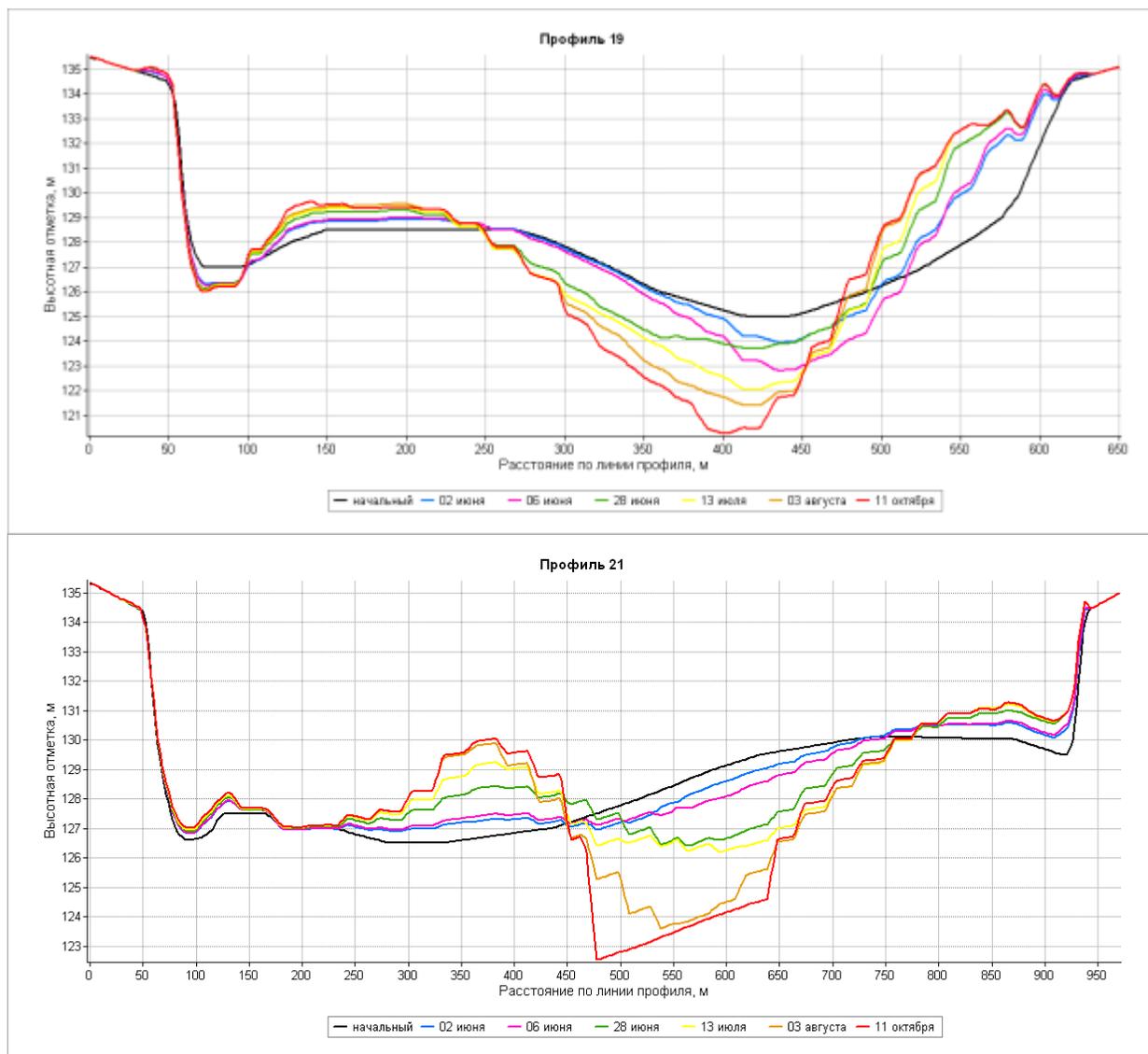


Рисунок 6.8 – Рельефа дна по линии профилей 19, 21 (рис. 6.3) в различные моменты модельного периода

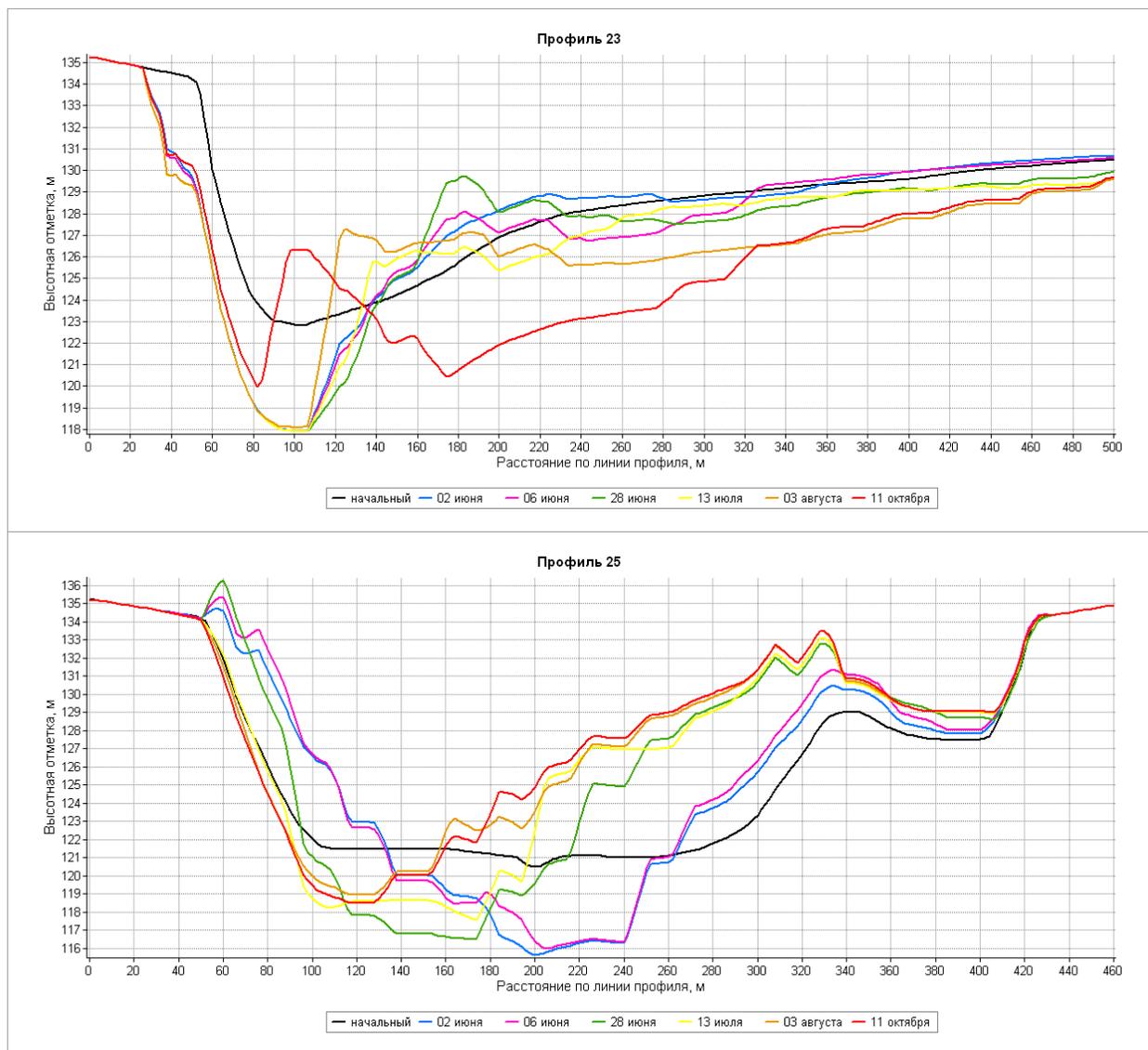


Рисунок 6.9 – Рельефа дна по линии профилей 23, 25 (рис. 6.3) в различные моменты модельного периода

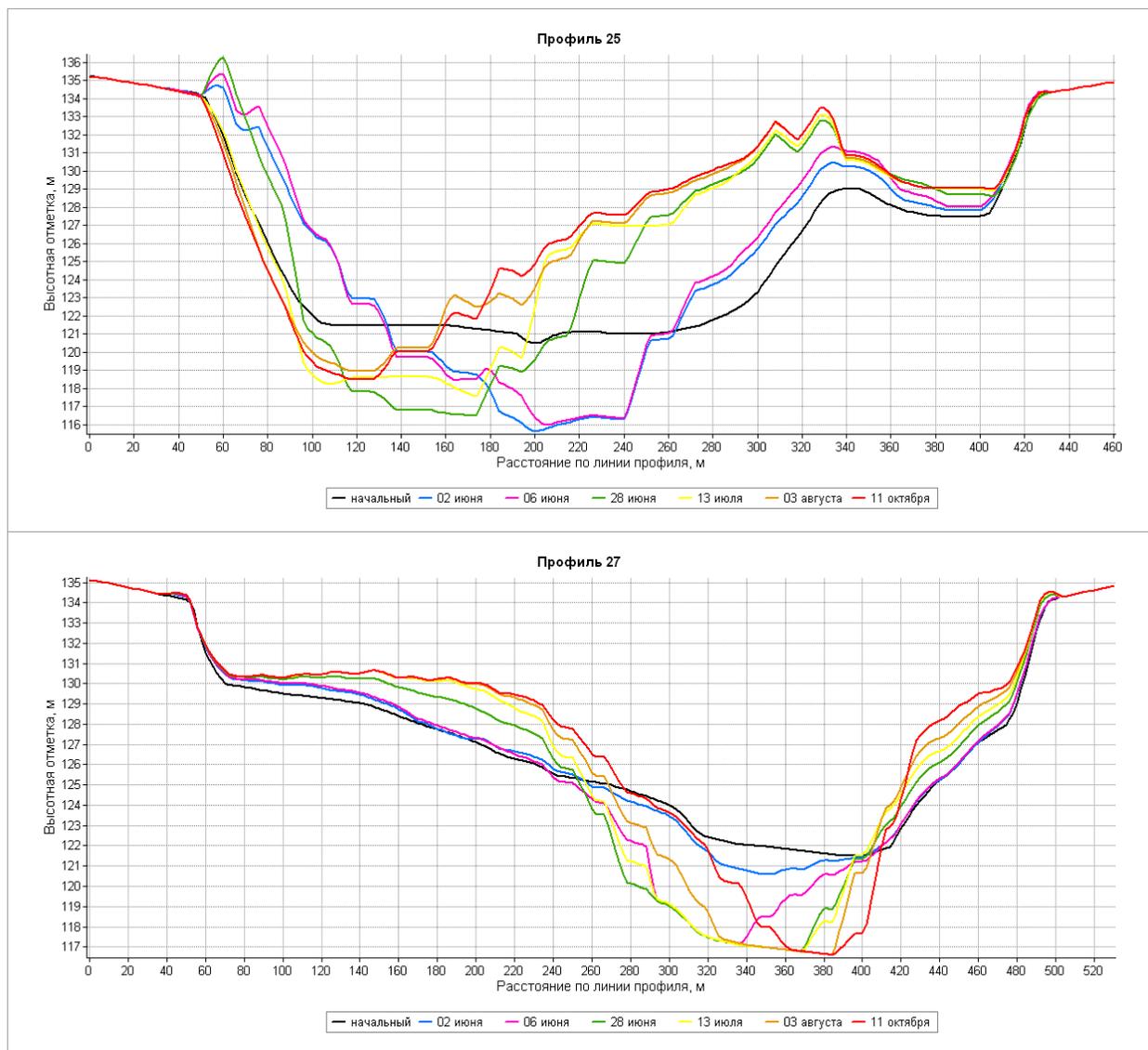


Рисунок 6.10 – Рельефа дна по линии профилей 25, 27 (рис. 6.3) в различные моменты модельного периода

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной в рамках Проекта работы разработана компьютерная модель, описывающая гидро- и морфодинамику реального протяженного участка русла крупной реки в нестационарных гидрологических условиях на масштабе времени активной фазы гидрологического цикла от момента вскрытия реки до наступления осенне-зимней межени.

Выполненное компьютерное моделирование руслового процесса на участке р. Обь у г. Барнаула протяженностью 20 км, имеющем сложное гидроморфологическое строение, дало хорошее качественное соответствие результатов расчета с данными натурных наблюдений. Эти результаты правильно отражают основные черты руслового процесса, протекающего на рассматриваемом участке в современных условиях.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на то, чтобы добиться не только качественного, но и количественного соответствия.

Основные результаты НИР за 2019г. опубликованы в [23-25].

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. <https://www.google.com/earth/>
2. Дьяченко А.В., Марусин К.В., Коломейцев А.А., Вагнер А.А. Натурные исследования пропускной способности рукавов русловых разветвлений и пойменных проток реки Обь на участке Барнаул – Камень-на-Оби / Известия Алтайского отделения Русского географического общества. – 2017 – №3(46) – с. 54-63.
3. <http://gis.vodinfo.ru>. ГИС-портал Центра регистра и кадастра. Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России.
4. <https://www.sontek.com/productsdetail.php?RiverSurveyor-S5-and-M9-14>
5. Генеральный план городского округа – города Барнаула Алтайского края. Схема транспортной инфраструктуры [Электронный ресурс] / Администрация города Барнаула – [URL:http://barnaul.org/upload/medialibrary/0cb/karta-oks\\_transport\\_b\\_5\\_75.pdf](http://barnaul.org/upload/medialibrary/0cb/karta-oks_transport_b_5_75.pdf)
6. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 2: Морфодинамика речных русел. – М: КРАСАНД, 2011. – 960 с.
7. Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В. Речные излуины. М.: изд-во МГУ, 2004. – 371 с.
8. 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.
9. Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. – Спб.: Нестор-История, 2011. – 504 с.
10. Русловые процессы на реках Алтайского региона. Под ред. проф. Р.С. Чалова. – М.: Изд-во Московского государственного университета, 1996. – 244 с.
11. Попов И.В. Загадки речного русла. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 168 с.
12. Военная топография / А.А. Псарев, А.Н. Коваленко, А.М. Куприн, Б.И. Пирнак. – М.: Воениздат, - 1986. – 384 с.
13. Раткович Д.Я. Динамика речных русел. – М.: ГЕОС, 2007. – 156 с.
14. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Смищенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 272 с.

15. Partheniades, E., 1965. "Erosion and Deposition of Cohesive Soils." *Journal of the Hydraulics Division, ASCE* 91 (HY 1): pp. 105–139.
16. Rijn, L. C. van, 1993. *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Aqua Publications, The Netherlands.
17. 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.
18. 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.
19. Гишанин К.В. Динамика русловых потоков: Изд. 2-е. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 312 с.
20. Iwasaki T, Shimizu Y, Kimura I. Numerical simulation of bar and bank erosion in a vegetated floodplain: A case study in the Otofuke River / *Advances in Water Resources* Vol. 93 (2016). – pp. 118–134.
21. Барышников Н.Б. Русловые процессы. Учебник. – СПб.: изд. РГГМУ, 2006. – 439 с.
22. Delft3D-FLOW User Manual. WL / Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands, 2013. – 706 с.
23. Зиновьев А.Т., Дьяченко К.В., Кошелев К.Б., Марусин К.В. Натурные наблюдения и математическое моделирование динамики руслового потока на участке реки Обь у водозабора № 1 города Барнаула // *Гидрометеорология и экология: Достижения и перспективы развития: Труды III Всерос. конф. (18-19 декабря 2019 г., Санкт-Петербург, ГГИ)*. - СПб: ХИМИЗДАТ, 2019. 1023 с. - с. 388-391.
24. Марусин К.В., Дьяченко К.В., Вагнер А.А., Коломейцев А.А. Натурные исследования русловых процессов на участке реки Обь у г. Барнаула // *Известия АО РГО*. 2019. № 4.
25. Зиновьев А.Т., Дьяченко А.В., Кошелев К.Б., Марусин К.В. Прогнозирование русловых процессов на участках крупных рек на основе моделирования и наблюдений // *Eurasian journal of mathematical and computer applications*. 2020 (в печати)