

УДК 532.5; 532.5.032

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РУСЛОВОГО ПОТОКА ДЛЯ ПРОГНОЗОВ ВЛИЯНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА В ПОЙМАХ НА ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ КРУПНЫХ РЕК (НА ПРИМЕРЕ РЕКИ ОБЬ)

© 2017 г. А.Т. Зиновьев, К.Б. Кошелев, К.В. Марусин,
Е.Д. Кошелева

ФГБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения
Российской академии наук», г. Барнаул, Россия

Ключевые слова: гидрологический режим, русловой поток, прогнозирование, компьютерное моделирование, цифровая модель рельефа, р. Обь, гидрологические процессы.



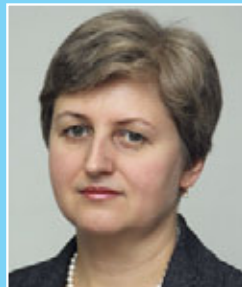
А.Т. Зиновьев



К.Б. Кошелев



К.В. Марусин



Е.Д. Кошелева

Рассмотрены вопросы прогнозирования влияния строительства в поймах на гидрологические и русловые процессы на прилегающих участках крупных рек. Предложены математические модели течений и русловых процессов на участках рек со сложной морфометрией русла и поймы. С их использованием решена важная научно-практическая задача по оценке влияния планируемого строительства на затопление пойменных территорий и размыв русла р. Обь у г. Барнаула. Расчеты для рассматриваемого участка Оби выполнены по компьютерной гидродинамической модели, построенной с использованием гидрологических данных, результатов русловой съемки и геодезических работ. Показано воздействие планируемого строительства на уровни воды, скорости течения и размывы русла реки при разных расходах р. Обь. Оценено влияние гидрологических и русловых процессов на участок проектируемого сооружения.

ВВЕДЕНИЕ

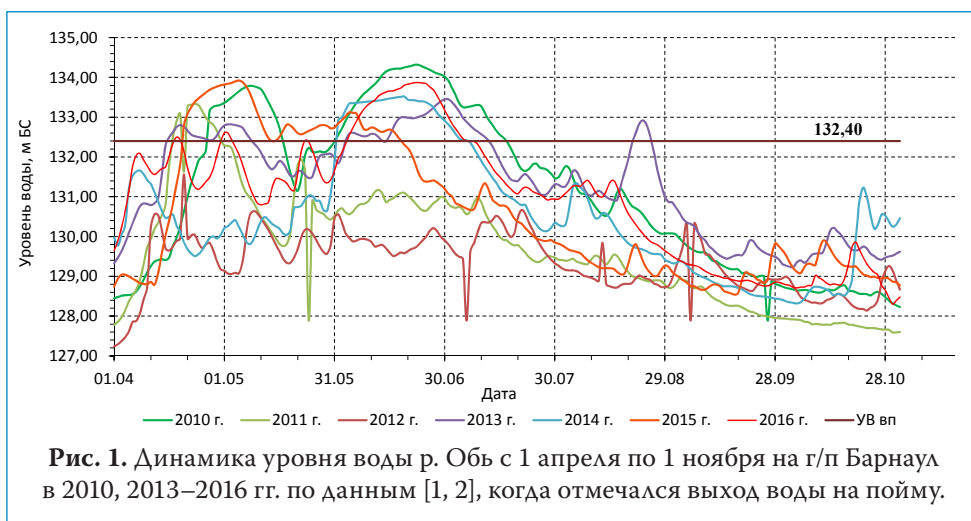
Реализация крупных строительных проектов на пойменных территориях часто негативно влияет на гидрологический режим рек: в т. ч. повышаются отметки максимальных уровней воды при половодьях и паводках и ускоряются процессы размыва берегов. В связи с этим достоверные количественные оценки влияния строительства на гидрологические процессы в руслах и поймах рек важны для научного обоснования предлагаемых проектных решений.

К особенностям гидрологического режима Оби на участке у г. Барнаула следует отнести продолжительность половодья в весенне-летний период с апреля по август и наличие 2–3 подъемов уровней воды. Характерные расходы в половодье составляют 4000–6000 м³/с. Высота подъема уровня воды в этот период обычно достигает 4–5 м, в отдельные многоводные годы 6–7 м. Экстремальный (0,81 % обеспеченности) расход воды 12 600 м³/с отмечался в 1969 г. Однако самый высокий уровень воды в районе Барнаула наблюдался 16 мая 1937 г. – 763 см (135,52 м БС) [1].

Поступление воды в гидрографическую сеть поймы начинается при уровнях воды на гидропосту (г/п) Барнаул около 450 см (132,40 м БС). Устойчивое затопление поймы происходит при уровнях, превышающих 500 см (132,90 м БС), полное затопление при уровнях 710 см (134,99 м БС) [1]. По данным Центра регистра и кадастра РФ, уровнем затопления для г/п Барнаул является 520 см (133,09 м БС), опасным считается уровень 615 см (134,04 м БС) [2].

За последние 70 лет правобережная пойма р. Обь у г. Барнаула затапливалась весной и летом 52 раза (в 80 % случаев). Глубина затопления поймы колеблется в диапазоне от 20 см до 2 м, но чаще всего не превышает 1 м. Продолжительность затопления поймы также меняется в широких пределах – от 4 до 80 дней, составляя в среднем 30–40 сут. В периоды снеготаяния с 2010 по 2016 гг. в пяти случаях из семи отмечался выход воды на пойму (рис. 1).

Левобережная пойма Оби при больших расходах воды также подвержена воздействию высоких вод, которые поступают на территорию Барнаула по пойменным понижениям ниже устья р. Барнаулка. Сам устьевой участок р. Барнаулка в половодье находится в подпоре уровнями р. Обь. При этом на расстоянии до 1,5 км от Оби в кварталах города, расположенных у Барнаулки, повышаются уровни грунтовых вод [3]. В приустьевой части Барнаулки расчетный уровень высоких вод 1 % обеспеченности подпорного характера равен 135,9 м БС [4]. При увеличении подпора Оби в результате планируемого строительства конгрессно-выставочного центра «Барнаул» (КВЦ) на правобережной пойме ситуация с затоплением и подтоплением территории города из-за повышения максимальных уровней воды при весенних половодьях и дождевых паводках может усугубиться.



Объект исследования

В силу вышеперечисленных особенностей гидрологического режима р. Обь у г. Барнаула все проекты сооружений в русле и на затапливаемой пойменной территории должны анализироваться с точки зрения их влияния на русловые процессы, а сами последствия количественно оцениваться. К числу таких относятся инженерные мероприятия, связанные со строительством конгрессно-выставочного центра «Барнаул» на правобережной пойме Оби, напротив речного вокзала г. Барнаула – ниже автомобильного моста (рис. 2).

После ввода в строй в 1997 г. нового автомобильного мостового перехода через р. Обь и подъездных путей к нему, остров Помазкин фактически стал полуостровом с двумя затонами (заливами) – нижним (по течению) и верхним. Поскольку название «остров» является исходно географически верным и принято в официальных навигационных документах речного транспорта [6], будем именовать далее данный объект островом.

Топография о. Помазкин типична для русловых и пойменных островов Оби в районе Барнаула. Поверхность острова возвышается на 1–3 м над меженным уровнем воды, имея отметки 131–133,5 м БС. Левая часть территории острова, прилегающая к руслу, более высокая, пересеченная прирусловыми валами; прилегающая к нижнему затону правая – более низкая. Поверхность острова по большей части покрыта древесно-кустарниковой растительностью и в половодье регулярно затапливается.

Для сооружения КВЦ в пойме готовится площадка размером около 36 га с отметкой 138,1 м БС, для чего будет произведена выемка грунта для отсыпки (песок) из подводного карьера в нижнем затоне. При этом изменится форма русла, очертания берегов и сама поверхность острова.



Рис. 2. Местоположение объекта. Спутниковый снимок 18.08.2009. Расход воды в р. Обь – 1890 м³/с [5].

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

При оценке последствий опасных гидрологических явлений, таких как затопление пойменных территорий в результате половодий и паводков, достоверные результаты можно получить, в основном, с привлечением достаточно сложных математических моделей течений. В настоящее время для расчета течений в пространственной области, включающей водотоки длиной десятки и сотни километров, наиболее часто используется плановая (2DH) гидродинамическая модель [7]. Примеры ее реализации представлены в работах [8–11]. Следует отметить, что наряду с оригинальными научными разработками [8–10], существует большое количество коммерческих программных продуктов на основе плановых моделей, которые описывают уровни водной поверхности, поля скоростей и качество воды в водоемах и водотоках, транспорт наносов и т. д. (MIKE 21, Delft3D, SMS) [12–14]. Данные программные продукты имеют широкий диапазон возможностей для успешного решения различных научно-практических задач [11–14]. Выбор той или иной численной реализации гидродинамической 2DH-модели существенно определяется имеющимся опытом решения соответствующих научно-практических задач.

Таким образом, для получения количественной оценки влияния сооружения КВЦ на гидрологические процессы в р. Обь около г. Барнаула при-

менены методы математического (компьютерного) моделирования. Для постановки начально-краевой задачи использованы нестационарные уравнения течения в русле и на пойме, полученные в рамках приближения теории мелкой воды (2ДН-модель). Данная модель течения представлена уравнениями неразрывности (1) и движения (2)–(3) [15]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial huu}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} hK \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} hK \frac{\partial u}{\partial y} - r|\vec{u}|u, \quad (2)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hvv}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} hK \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} hK \frac{\partial v}{\partial y} - r|\vec{u}|v, \quad (3)$$

где $|\vec{u}| = \sqrt{u^2 + v^2}$, $r = \frac{g}{C_{sh}^2}$, $C_{sh} = \frac{h^{1/6}}{n}$;

h – глубина, м;

u, v – скорости течения по координатам x, y соответственно, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$H = h + \delta$ – уровень свободной водной поверхности, м;

K – коэффициент (турбулентной) вязкости;

C_{sh} – коэффициент Шези по формуле Маннинга;

n – коэффициент шероховатости дна речной долины.

Уравнения (1)–(3) решаются в области, граница которой может меняться со временем, например, в результате изменения уровня воды в процессе половодья.

Для изучения влияния строительства в пойме на русловые процессы уравнения (1)–(3) дополнены соотношениями (4)–(5), описывающими перемещение рыхлого (несвязного) материала потоком, которое начинается в случае, если средняя по глубине скорость потока превысит некоторое критическое (неразмывающее) значение. В отечественной литературе, как и в зарубежной, к настоящему времени имеется более десятка различных формул для определения критической скорости потока U_k [16–20]. Для большей надежности оценок в работе использованы две широко известные и часто применяемые в инженерной практике формулы для определения критической скорости Г.И. Шамова и В.Н. Гончарова [16, 20].

Критическая скорость U_k , м/с, для русловых наносов по формуле Шамова [16] определяется следующим образом:

$$U_k = 6,0 (d_{50})^{1/3} (h^{1/6}), \quad (4)$$

где d_{50} – медианная крупность наносов, м; h – глубина воды, м.

Формула В.Н. Гончарова для критической скорости (U_k) по [20] имеет вид:

$$U_k = 0,96 \sqrt{g} (d_{50} + 0,0014)^{0,3} \left(\frac{d_{50}}{d_{90}} \right)^{0,2}, \text{ м/с} \quad (5)$$

где d_{50} – медианная крупность наносов, соответствующая 50 % по кривой гранулометрического состава, м;

d_{90} – крупность наносов, соответствующая 90 % по кривой гранулометрического состава, м;

h – глубина воды, м;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Компьютерная модель русловых процессов на участке

р. Обь у г. Барнаула

Описанная выше нестационарная гидродинамическая 2DH-модель течения численно реализована, к примеру, в работе [21] и программном комплексе (ПК) Delft3D [13]. Сопоставительные расчеты по этим двум численным гидродинамическим моделям показали близость результатов вычислений между собой и данными наблюдений. Исходя из удобства постпроцессорной обработки данных и возможностей графического представления результатов, при построении компьютерной модели течения на участке р. Обь у г. Барнаула был использован ПК Delft3D.

Область моделирования охватывает русло и пойму Оби на участке между новым автомобильным и железнодорожным мостом. Ее размеры составляют $5,5 \times 10,0$ км. Выходной створ модели расположен на 200 м выше по течению железнодорожного моста на водомерном посту г. Барнаула.

Для построения цифровой модели рельефа (ЦМР) (рис. 3) использовали:

– данные промеров русла, проток и затонов М 1:2000, полученные сотрудниками ИВЭП СО РАН в октябре 2014 и июне 2015 гг. в рамках программы фундаментальных исследований РАН [22];

– данные топосъемочных и геодезических работ лаборатории гидрологии и геоинформатики ИВЭП СО РАН, полученные в ходе обследования о. Помазкин 10–11 июня 2015 г.;

– данные топографической съемки района строительства площадки КВЦ, полученные в ходе проектно-изыскательских работ М 1:500 [23];

– данные топографической съемки участков правобережной поймы реки в районе о. Помазкин М 1:2000, выполненной в октябре 1996 г. [23];

– топографические карты М 1:25000 крайнего обновления с состоянием местности на 1997 г. [23].

При построении компьютерной модели течений в период половодий для учета сопротивления подстилающей поверхности использовали коэффициент шероховатости Маннинга (n), который отличается для русла и пой-

мы [16–18]. Для основного русла по [17, 18] было принято значение n равным 0,025, для пойменных участков, покрытых луговой растительностью и мелким кустарником – 0,05, для пойменных участков, покрытых подлеском и лесом – 0,1.



Для оценки возможного размыва русла и строительной площадки учитывали значения неразмывающей скорости потока, рассчитанной по формулам (4)–(5), и характеристики крупности наносов. Гранулометрический состав грунта, из которого планируется производить отсыпку площадки, получен в результате предпроектных инженерно-геологических изысканий по данным четырех скважин, расположенных по оси нижнего затона [23]. Изыскания показали, что это мелкий песок средней плотности аллювиальных отложений четвертичного голоцена (aQ_{IV}). Значения крупности (d_{50} и d_{90}) определялись по гранулометрической кривой в предположении, что распределение является лог-нормальным [19].

Для выполнения численных расчетов была создана расчетная пространственная сетка (427×214 ячеек). Сетка является криволинейной, ортогональной, неравномерной. Наибольшее сгущение разностных ячеек создано в окрестности русла реки и в районе расположения площадки проектируемого КВЦ (рис. 4). Такая структура сетки обеспечивает необходимую точность вычислений при приемлемых требованиях к вычислительным мощностям используемых компьютеров.

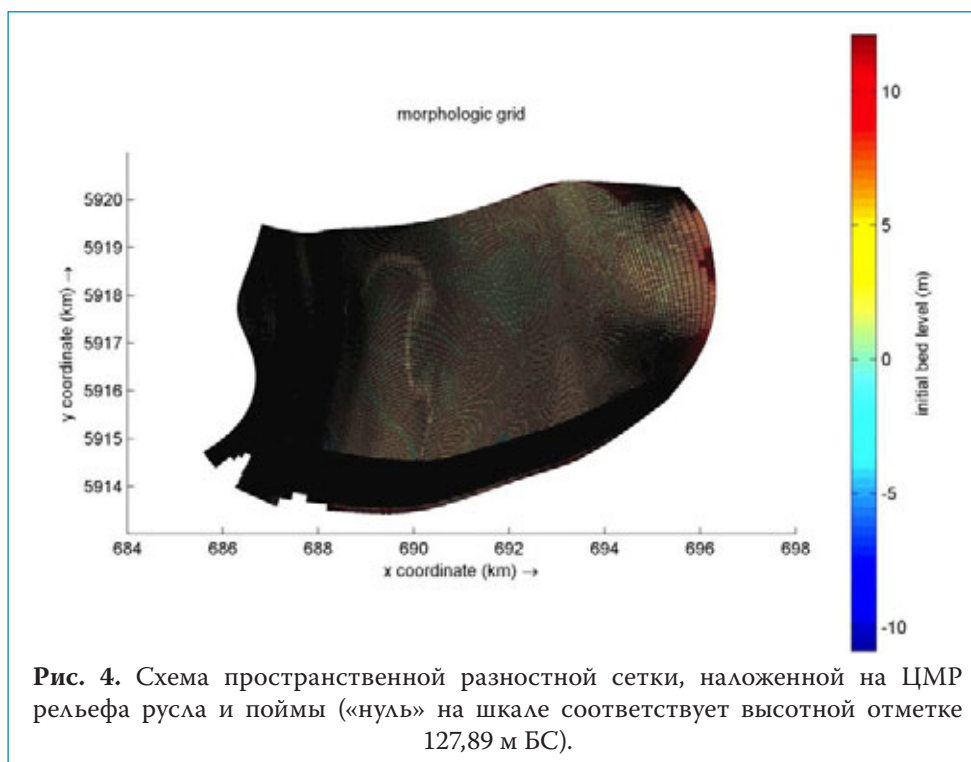


Рис. 4. Схема пространственной разностной сетки, наложенной на ЦМР рельефа русла и поймы («нуль» на шкале соответствует высотной отметке 127,89 м БС).

С целью проверки корректности выбранного для русла значения коэффициента шероховатости выполнены тестовые расчеты с параметрами течения, соответствующими ситуации на 5 июня 2015 г. По данным Алтайского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета на 8-00 5 июня уровень воды по г/п Барнаул достигал 528 см, расход воды – 4150 м³/с. В этот же день с 10 до 11 ч сотрудниками ИВЭП СО РАН были выполнены натурные измерения глубин Оби в двух створах, расположенных в районе о. Помазкин. Хорошее соответствие результатов расчетов глубин течения с данными измерений (рис. 5) свидетельствует о приемлемости принятых значений коэффициента шероховатости.

Вариантные сценарии для проведения расчетов

В результате компьютерного моделирования анализировались течение и русловые процессы для двух различных рельефов – поймы в бытовых (естественных) условиях и поймы после проведения инженерных работ. Результатом последних являются: появление на пойме искусственной площадки с отметкой уровня 138,1 м БС и выемка грунта из подводного карьера в нижнем затоне, что моделировалось опусканием дна подводного карьера до отметки 120 м БС.

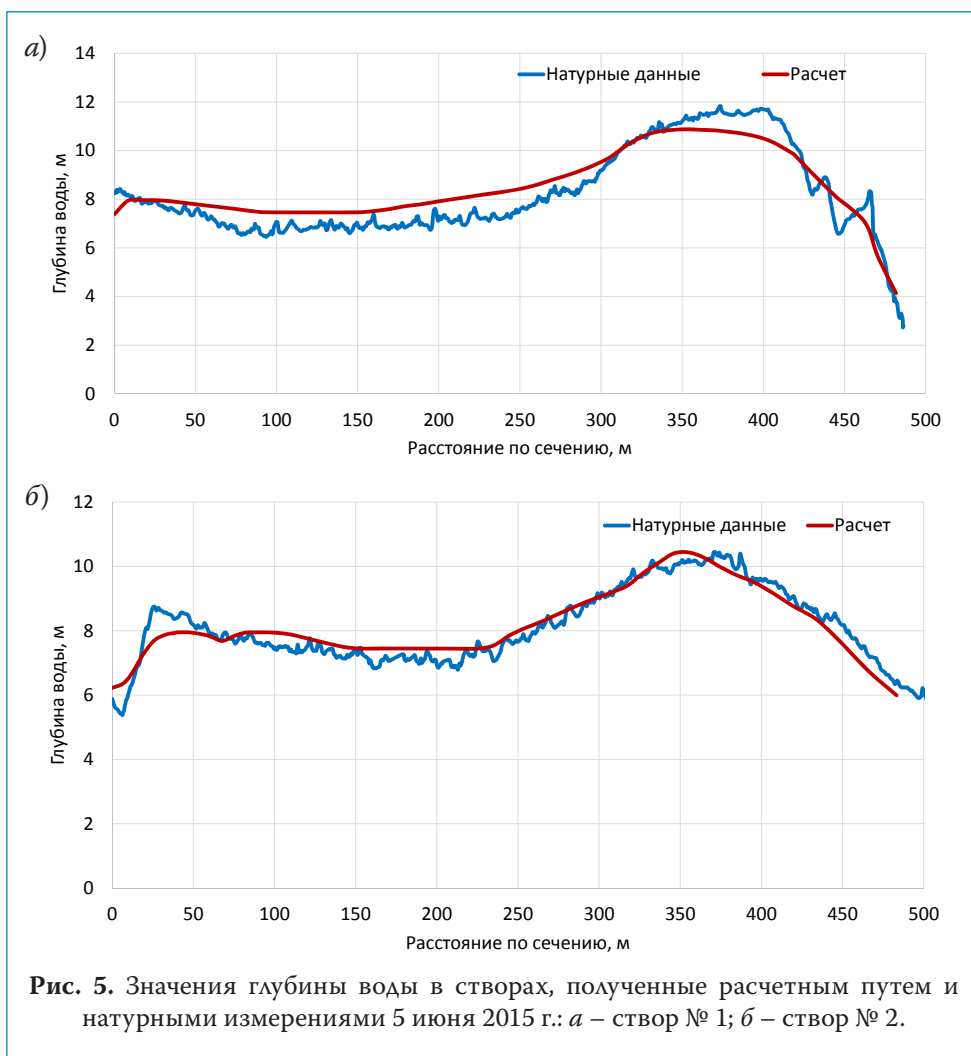
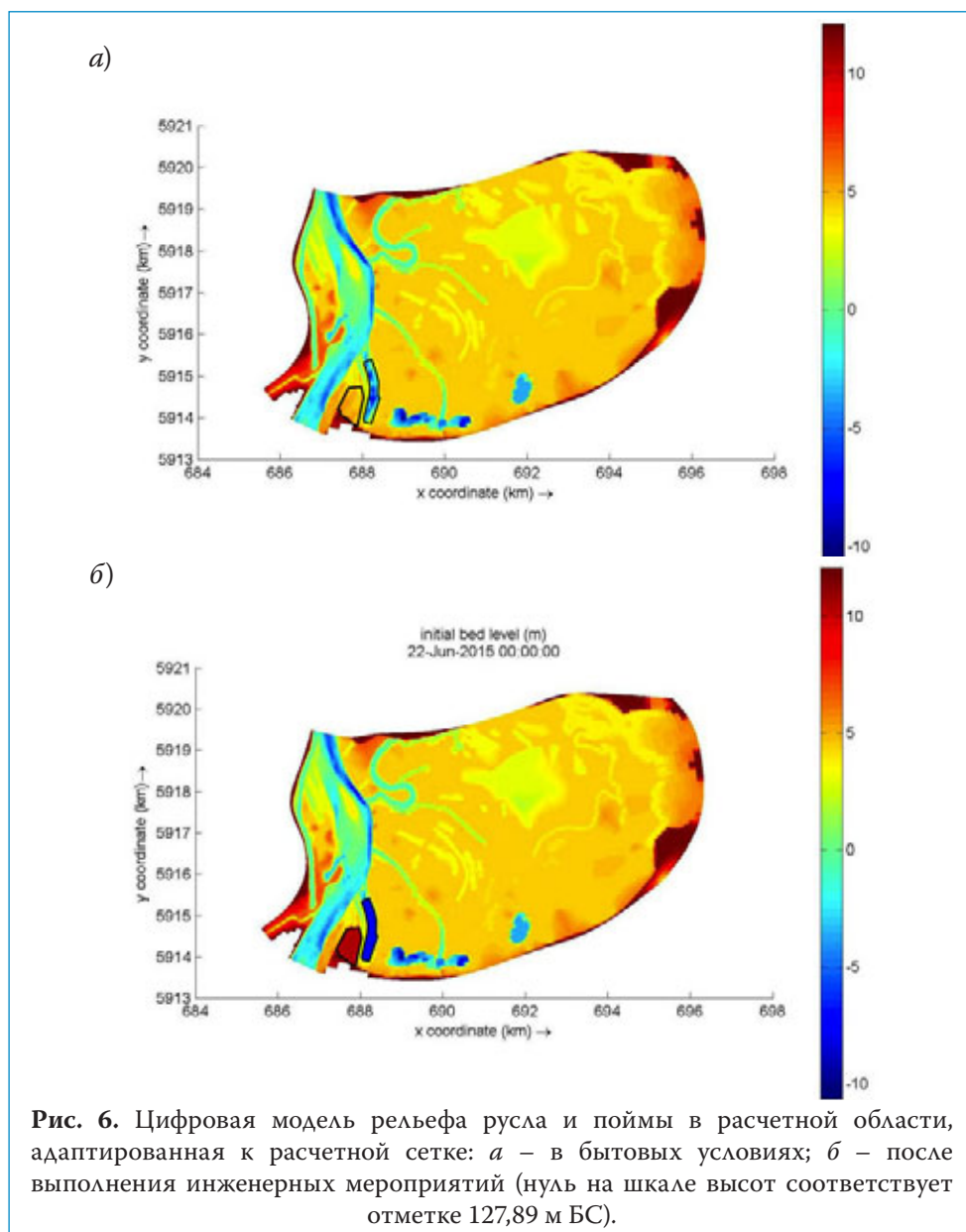


Рис. 5. Значения глубины воды в створах, полученные расчетным путем и натурными измерениями 5 июня 2015 г.: а – створ № 1; б – створ № 2.

Адаптированные к расчетной сетке цифровые модели рельефа рассматриваемой части поймы для бытовых условий и в условиях, возникающих после реализации инженерных мероприятий (отсыпки площадки и выемки грунта из карьера), приведены на рис. 6.

В работе рассмотрены гидрологические ситуации, реализующиеся при прохождении расходов воды 1,5 и 10 % обеспеченности. Значения расходов данных обеспеченностей следующие: 1 % – 10 600, 5 % – 8430, 10 % – 7220 м³/с [23]. Кроме того, моделировалась ситуация прохождения экстремального (максимального за 1893–2015 гг. наблюдений) расхода воды 12 600 м³/с, отмеченного в 1969 г.



При проведении сценарных расчетов квазистационарных течений ставятся следующие граничные условия: во входном створе расчетной области задается расход воды, а в замыкающем створе – отметки уровня водной поверхности. Используемый программный комплекс Delft3D позволяет

автоматически определять фактические размеры сечений входного и замыкающего створов при условии, что начальное приближение размеров этих створов задано с некоторым превышением.

Отметки уровня воды в замыкающем створе, соответствующие расходам воды 1, 5, 10 % обеспеченности и экстремальному расходу задавались на основе результатов исследований, выполненных ранее в ИВЭП СО РАН [24]. Их значения приведены в таблице.

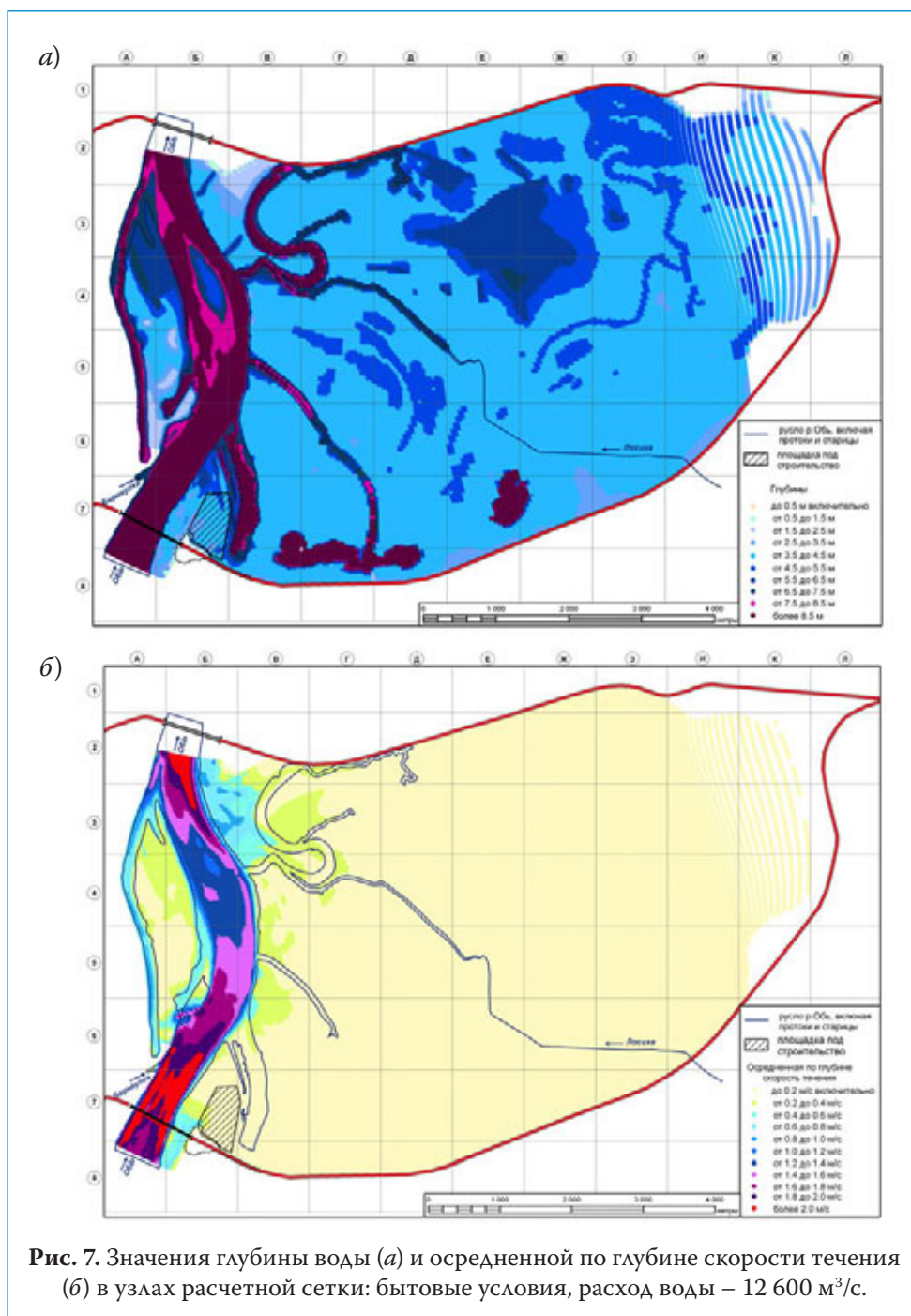
Таблица. Данные по расходам и уровням для г/п Барнаул

Значения обеспеченности (для расходов)	Расходы воды во входном створе, м ³ /с	Уровни воды в замыкающем створе, (над нулем г/п Барнаул, см)
0,81 %	12 600	840
1 %	10 600	800
5 %	8430	725
10 %	7220	683

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для решения задачи по оценке взаимного влияния проектируемого сооружения КВЦ в правобережной пойме и гидрологических процессов в районе г. Барнаула моделировалось течение в р. Обь при расходах разной обеспеченности. Расчеты показали, что в бытовых (естественных) условиях при расходах 10 % обеспеченности вся пойменная территория, отведенная под строительную площадку КВЦ, затапливается на глубину до 2,5 м. При расходах 1 % обеспеченности глубина затопления составляет 4,5 м (отметка уровня воды равна 136,34 м БС). При экстремальном расходе 12 600 м³/с глубина затопления более 5 м, отметка уровня воды – 136,82 м БС (рис. 7). Расчеты показали, что при проектной высотной отметке, равной 138,1 м БС, площадка сооружения затапливаться не будет.

Для оценки влияния проектируемого сооружения на гидравлические характеристики речного потока (уровни и скорости) вблизи площадки под фундамент КВЦ с отметкой поверхности 138,1 м БС и размером 36 га выполнены варианты расчеты с расходами обеспеченности 1 % (10 600 м³/с) и 0,81 % (экстремальным 12 600 м³/с). Расчеты показали (рис. 7а), что при наличии на пойме площадки под строительство уровни воды перед ее фронтом, обращенным к руслу реки, возрастут по сравнению с бытовыми условиями не более чем на 20 см. Высотная отметка уровня воды даже при максимальном расходе не превысит значения 137,06 м БС, при этом зона роста уровня локализована в корневой части площадки, примыкающей к дорожно-мостовым сооружениям.



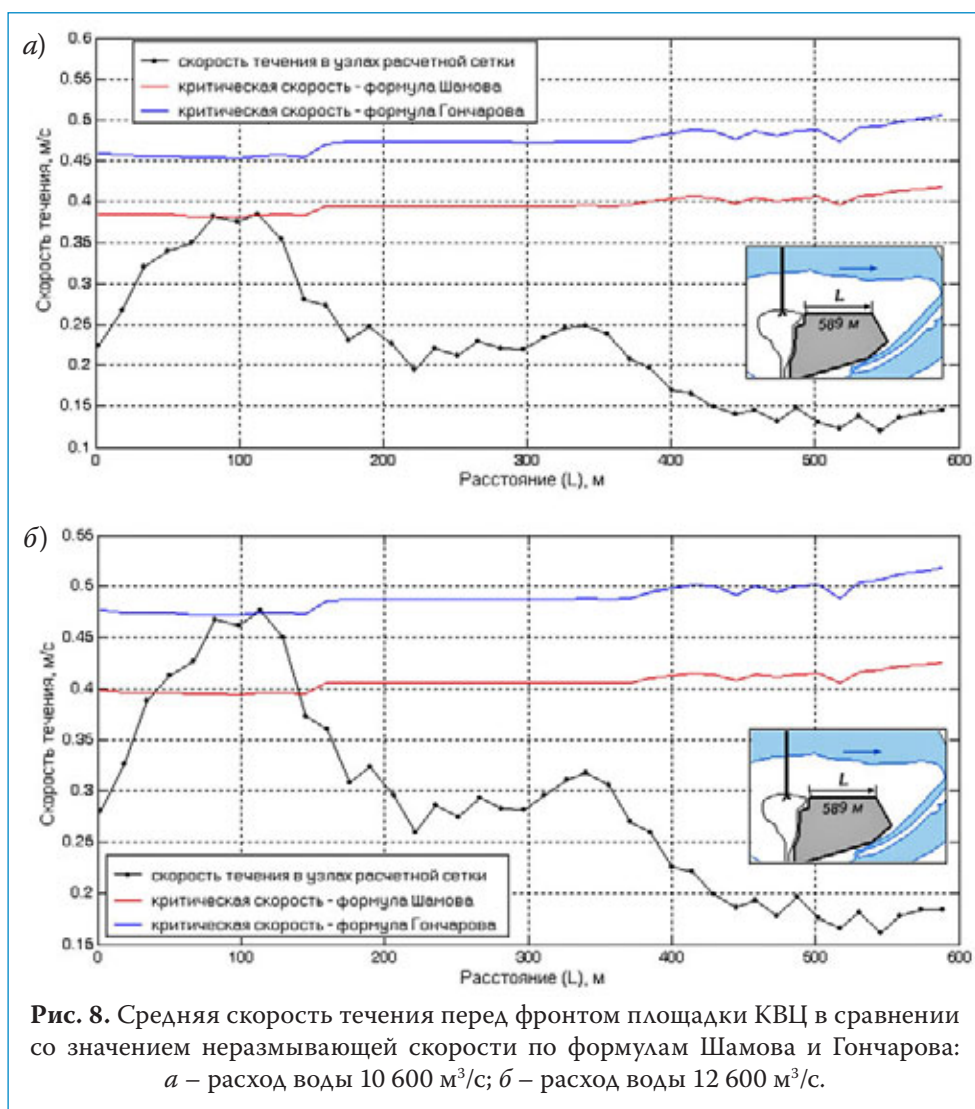
Скорости течения воды перед фронтом площадки возрастут на 0,2 м/с по сравнению со скоростями течения на пойме в бытовых условиях (рис. 7б). Область относительно высоких скоростей расширится и распространится вдоль площадки вниз по течению. Отметим, что строительство примыкающей к дамбе мостового перехода площадки для сооружения КВЦ делает картину скоростного поля течения в рассматриваемой области более однородной.

На рис. 8 приведены результаты сравнения величины средней скорости течения (расходы 1 и 0,81 % обеспеченности) перед фронтом сооружения, обращенным к руслу, со значениями неразмывающей (критической) скорости, рассчитанными по формулам Шамова (4) и Гончарова (5). Для значения критической скорости, определенной по формуле Шамова, размыв грунта начнется при меньшей скорости потока, чем для критической скорости по формуле Гончарова. Разница в значениях этих критических скоростей составляет ~ 0,8 м/с. Следует отметить, что при расходе 1 % обеспеченности размыва грунта сооружения практически не будет (рис. 8а). Однако существует вероятность локального размыва нижней части площадки в случае максимального расхода (рис. 8б).

Другим фактором, который может оказать влияние на долговременную устойчивость сооружения, являются плановые деформации русла Оби у г. Барнаула. В настоящее время прилегающий к руслу реки берег о. Помазкин по всей своей длине размывается. Размытый на этом участке реки материал откладывается затем у выхода из нижнего затона (см. рис. 2).

Размыв берега острова, судя по ретроспективным топографическим данным, начался еще в 1980-х годах, но до этого времени шел процесс намыва отложений: за 1951–1975 гг. площадь острова увеличилась более чем в четыре раза. Сейчас размыв берега продолжается. Сопоставление данных съемок 1996 и 2015 гг. показывает, что берег за этот период отступил вглубь острова на 45–50 м со средней скоростью 2,0–2,5 м/год. Очевидно, что направленность и интенсивность плановых деформаций русла в районе о. Помазкин определяется ходом руслового процесса на вышележащих участках реки. Так, интенсивный рост территории острова совпадает по времени со спрямлением Айдаровско-Жениховской излучины.

В настоящее время не наблюдается каких-либо предпосылок к существенной перестройке русла (подобно спрямлению вышеназванной излучины) на участке р. Обь выше о. Помазкин. Создание таких предпосылок естественным путем, без вмешательства техногенного фактора, займет не один десяток лет. Берег острова в среднесрочной перспективе будет продолжать медленно размываться примерно с той же средней скоростью отступления (до 2,5 м/год). Реальная угроза площадке КВЦ от наблюдаемых русловых деформаций возникнет не скоро.



Как было отмечено выше, проблема затопления и подтопления отдельных территорий г. Барнаула при половодьях и паводках малой обеспеченности весьма актуальна. С этой точки зрения важным является вопрос о влиянии сооружения площадки КВЦ на гидравлический режим русла и поймы Оби в районе г. Барнаула. При рассматриваемом проектном решении площадка КВЦ занимает 36 га и имеет максимальные линейные размеры 800 на 600 м, располагаясь на расстоянии около 300 м от русла реки. Отметим, что участок русла и пойменного массива Оби между новым автомобильным и же-

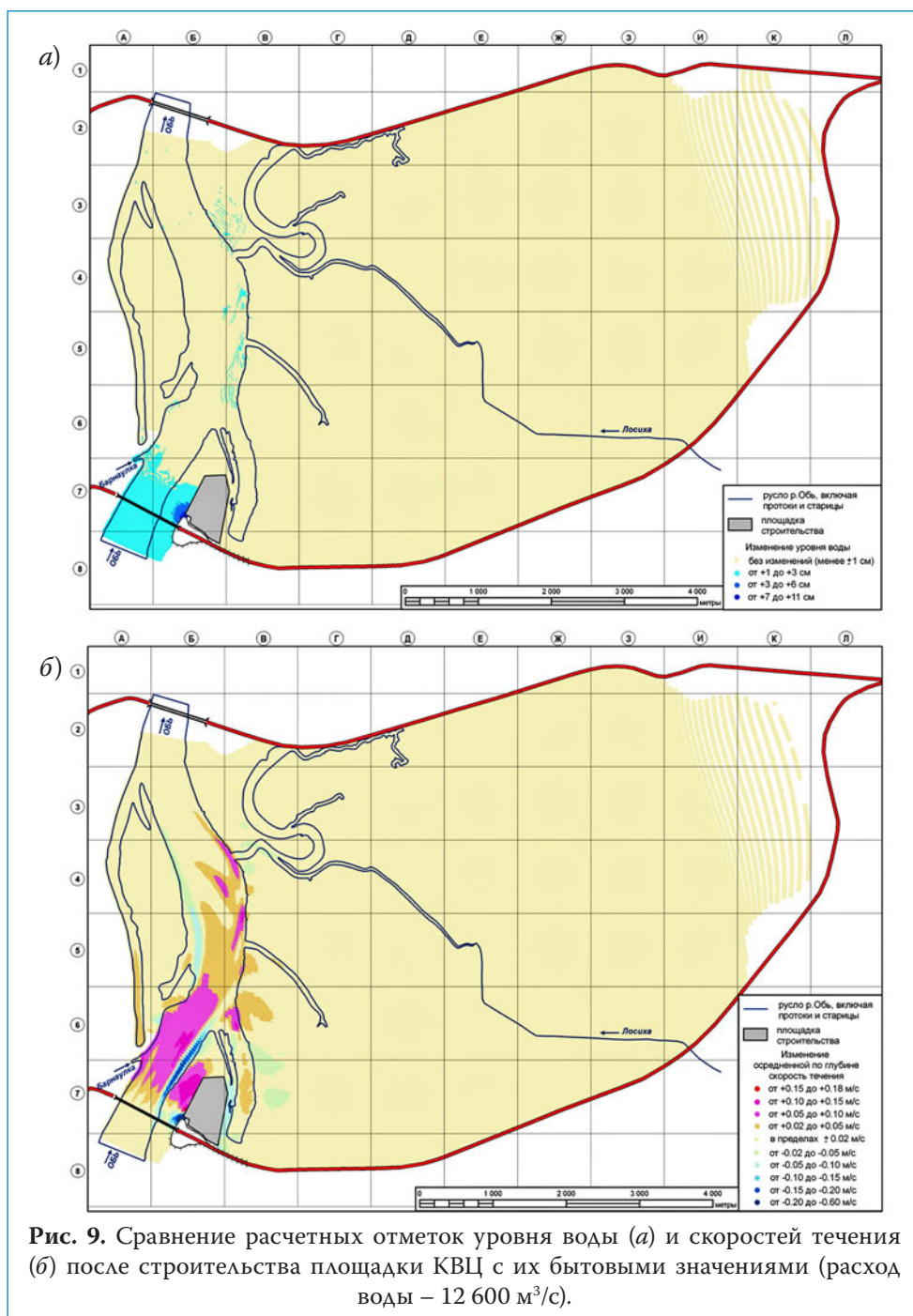
лезнодорожным мостами имеет площадь 5154 га, его протяженность по течению реки составляет 5,5 км, а в поперечном направлении – до 10 км. Грунт для отсыпки площадки предполагается брать со дна нижнего затона о. Помазкин, т. е. емкостные характеристики поймы в результате выполнения этих мероприятий не изменятся. На рис. 9 представлено сравнение расчетных отметок уровня воды (а) и скоростей течения (б) после строительства площадки с их бытовыми значениями до строительства.

По расчетам, при максимально наблюдаемом расходе воды (12 600 м³/с), рост значений отметок уровня по сравнению с бытовыми условиями не превысит 3 см, а скорости течения в русле реки увеличатся не более чем на 0,15 м/с. Рост значений скоростей и уровней воды будет наблюдаться локально на расстоянии не более 1,5 км от проектируемого сооружения. Таким образом, реализация данного проекта строительства КВЦ не окажет существенного влияния на гидравлический и русловой режим р. Обь в районе г. Барнаула.

ВЫВОДЫ

В результате выполненного исследования решена важная научно-практическая задача количественной оценки взаимного влияния строительства КВЦ в правобережной пойме на гидрологические процессы р. Обь у г. Барнаула. Для решения поставленной задачи построена компьютерная модель течения и русловых процессов на рассматриваемом участке реки в бытовых условиях и после выполнения запланированных инженерных мероприятий по строительству КВЦ.

Вариантные расчеты гидрологических характеристик течения выполнены для расходов 1, 5, 10 % обеспеченности и для экстремально высокого расхода 0,92 % обеспеченности, наблюдаемого в прошлом. Расчеты показали, что при проектной высотной отметке площадки для сооружения КВЦ затопления территории строительства не будет. Непосредственно строительство насыпной площадки на о. Помазкин не окажет существенно значимого влияния на гидравлический и русловой режим Оби в районе г. Барнаула. Даже при максимальном расходе рост отметок уровней воды по сравнению с бытовыми условиями не превысит 3 см, а скорости течения в реке увеличатся не более чем на 0,15 м/с. Это возрастание скоростей течения и уровней воды будет наблюдаться локально на расстоянии не более 1,5 км от сооружения. Гидравлическое воздействие речного потока на сооруженную строительную площадку будет незначительно. Укрепление откосов площадки для строительства КВЦ прочными, но дорогостоящими конструкциями (каменно-набросные одежды, железобетонные плиты и т. п.) можно признать нецелесообразным. Вполне допустимо иметь свободные откосы площадки с уклоном 1:5 – 1:7.



С учетом отсутствия влияния проектируемого строительства на русловые процессы на рассматриваемом участке р. Обь оценена направленность и интенсивность плановых деформаций русла в районе о. Помазкин. Берег острова в среднесрочной перспективе будет продолжать медленно размываться примерно с той же средней скоростью, что и последние 20 лет (до 2,5 м/год). Угроза размыва берега до площадки КВЦ в ходе плановых русловых деформаций в среднесрочной перспективе (25–30 лет) отсутствует.

Следует отметить, что предложенная методика исследований, основанная на построении компьютерных гидродинамических 2ДН-моделей с использованием данных натуральных измерений геометрии русла и поймы, глубин и скоростей течений, полученных с применением современного гидрологического и геодезического оборудования, апробированных программных комплексов типа Delft3D, позволяет выполнять широкий спектр вариантных расчетов для надежной количественной оценки влияния планируемого строительства в руслах и поймах рек на характеристики течений и русловых процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству рек России / Центр регистра и кадастра. Режим доступа: <http://gis.vodinfo.ru/>. Дата обращения: 25.11.2016.
2. Алтайский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – филиал ФГБУ «Западно-Сибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». Режим доступа: <http://meteo22.ru/>. Дата обращения: 25.11.2016.
3. Компьютерное моделирование русловых процессов для оценки влияния на р. Обь у г. Барнаула дноуглубительных мероприятий ниже устья р. Барнаулка в районе БГОО ВМК «Нептун» / Отчет о НИР // ИВЭП СО РАН, рук. А.Т. Зиновьев, Барнаул, 2014. 56 с.
4. *Швецов А.Я.* Геологическое строение и рельеф. Барнаул: Энциклопедия, 2000. 74 с.
5. Карты Imag©2015 DigitalGlobe: Режим доступа: <https://www.digitalglobe.com/>; <http://gisconf.ru/sessions/vector-digitalglobe>. Дата обращения: 04.11.2016.
6. Карта реки Обь от истока до Барнаула с приустьевыми участками рек Бия и Катунь. Обское государственное управление водных путей и судоходства. РосРечфлот. Новосибирск: ФГУП «Новосибирская картографическая фабрика», 2004. 44 с.
7. *Кюнж Ж.А., Холли Ф.М., Вервей А.* Численные методы в задачах речной гидравлики / пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1985. 256 с.
8. *Прокофьев В.А.* Численная плановая модель открытого потока при наличии на дне препятствий // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. № 3. С. 282–294.
9. *Беликов В.В., Семенов А.Ю.* Построение численных методов распада разрыва для решения уравнений теории мелкой воды // Тр. института общей физики. 1997. Т. 53. С. 5–43.

10. Храпов С.С., Хоперсков А.В., Кузьмин Н.М., Писарев А.В., Кобелев И.А. Численная схема для моделирования динамики поверхностных вод на основе комбинированного SPH–TVD подхода // Вычислительные методы и программирование. 2011. Т. 12. С. 282–297.
11. Лепихин А.П., Любимова Т.П., Ляхин Ю.С., Тиунов А.А., Богомолов А.В., Перепелица Д.И., Паршакова Я.Н. Гидродинамическое моделирование реки Вятки в среднем течении: постановка задачи, результаты решения // Водное хозяйство России. 2013. № 3. С. 16–32.
12. MIKE 21C-2D river hydraulics and morphology. Режим доступа: <http://www.dhisoftware.com/Products/WaterResources/MIKE21C.aspx>.
13. Delft-3D FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Version 3.15.33641, 28 April 2014. Delft The Netherlands: Deltares, 2014. 684 p.
14. Surface Water Modeling System. U.S. Army Corps of Engineer. Режим доступа: <http://chl.erdc.usace.army.mil/sms>.
15. Saint-Venant, A.J.C. Barré de, Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et a l'introduction de marées dans leurs lits. Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences. 1871.Vol. 73, P. 147–154, 237–240.
16. Караушев А.В. Речная гидравлика. Курс общей и специальной гидравлики для гидрологов: учебное пособие для студентов ВУЗов. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 416 с.
17. Graf Walter H. Fluvial Hydraulics. Chichester England: John Wiley & Sons, 2003. 681 p.
18. Барышников Н.Б. Динамика русловых потоков. СПб.: изд. РГГМУ, 2007. 314 с.
19. Гришанин К.В. Основы динамики русловых потоков: учеб. для институтов водн. трансп. М.: Транспорт, 1990. 320 с.
20. Гончаров В.Н. Движение наносов. Л.-М.: ОНТИ, 1938. 312 с.
21. Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б. Моделирование процесса затопления пойменных территорий для участков крупных рек со сложной морфометрией русла и поймы // Водное хозяйство России. 2013. № 6. С. 17–31.
22. Исследование процессов формирования стока и разработка информационно-моделирующих систем оперативного прогнозирования опасных гидрологических ситуаций для крупных речных систем Сибири / Отчет о НИР. № 01201374139. ИВЭП СО РАН. Барнаул, 2015. 28 с.
23. Комплекс «Конгрессно-выставочный центр «Барнаул». Магистральные сети электроснабжения, водоснабжения, водоотведения, газоснабжения. Формирование земляного сооружения. I этап – формирование земляного сооружения / Отчет по инженерно-гидрологическим работам. Гидрологическая записка. 15013/6. ИГМИ. Барнаул: АЛТАЙВОДПРОЕКТ, 2015. 39 с.
24. Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б., Голубева А.Б., Шибких А.А. Затопление пойменных территорий при половодьях и паводках различной обеспеченности (на примере Верхней Оби). Сопоставление подходов и моделей // Мат-лы III всеросс. конф. с междунар. участием «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов». Барнаул: ООО «А.Р.Т.», 2010. С. 591–595.

Сведения об авторах:

Зиновьев Александр Тимофеевич, д-р техн. наук, заведующий лабораторией гидрологии и геоинформатики, ФГБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИВЭП СО РАН), Россия, 656038, Алтайский край, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1; e-mail: zinoviev@iwer.ru

Кошелев Константин Борисович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, лаборатория гидрологии и геоинформатики, ФГБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИВЭП СО РАН), Россия, 656038, Алтайский край, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1; e-mail: koshelev@iwer.ru

Марусин Константин Валерьевич, научный сотрудник, лаборатория гидрологии и геоинформатики, ФГБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИВЭП СО РАН), Россия, 656038, Алтайский край, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1; e-mail: kat@iwer.ru

Кошелева Евгения Дмитриевна, канд. с.-х. наук, старший научный сотрудник, лаборатория гидрологии и геоинформатики, ФГБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИВЭП СО РАН), Россия, 656038, Алтайский край, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1; e-mail: edk@iwer.ru