

УДК 556.5.072

ВЛИЯНИЕ ПРОТИВОПАВОДКОВЫХ ДАМБ В ПОЙМЕ НА ФОРМУ ЗОНЫ ЗАТОПЛЕНИЯ, ПОЛЕ СКОРОСТЕЙ И ГЛУБИН ПОТОКА НА ПРИМЕРЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ УЧАСТКА РЕКИ КОНДОМА

Романовский Роман Владимирович,
keny146@gmail.com

ООО «Сибирьгидротехпроект»,
Россия, 635510, г. Томск, ул. Старо-Тракторная, 7.

Актуальность численного моделирования зон затопления, характеристик скоростного поля потока и отметок уровней воды рек исходит из потребностей практики инженерной разработки месторождений полезных ископаемых, которые зачастую располагаются в чрезвычайно сложных с гидрографической точки зрения условиях. В таких условиях стандартные методики расчетов указанных характеристик не позволяют достичь желаемого результата или не учитывают всего многообразия процессов, происходящих в открытых потоках, способных существенно повлиять на безопасный и безаварийный режим работы проектируемых сооружений.

Цель: на примере участка реки Кондома и расположенных в ее пойме существующих и проектируемых гидротехнических сооружений (противопаводковых дамб) и объектов строительства показать, каким образом данные объекты влияют на изменение формы расчетной зоны затопления, скоростного поля потока и уровней воды в условиях стесняющего воздействия на живое сечение потока при паводке редкой вероятности превышения (1 % обеспеченности).

Методы. Численное моделирование характеристик потока (расчетная зона затопления, распределение скоростей и направлений течения, расчетные уровни воды) на участке р. Кондома выполнялось при помощи моделирующей системы HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) версии 5.0.5. Модель строилась для трех различных сценариев: когда пойма реки относительно не нарушена и в ней отсутствуют противопаводковые дамбы и отвал вскрышной породы (сценарий № 1), при наличии в пойме существующей в настоящее время одной противопаводковой дамбы и породного отвала (сценарий № 2), при наличии в пойме всех существующих в сценарии № 2 объектов и проектируемой противопаводковой дамбы (сценарий № 3). Было произведено сравнение исследуемых характеристик р. Кондома на рассматриваемом участке при реализации всех трех сценариев.

Результаты. Для участка р. Кондома настроена имитационная модель прохождения половодья с вероятностью превышения максимального уровня 1 % по трем сценариям, один из которых (сценарий № 1) принят в качестве контрольного. Произведена калибровка модели, подобраны адекватные реальным условиям коэффициенты шероховатости поймы и русла. Получены численные характеристики потока (форма расчетной зоны затопления, распределение скоростей и направлений течения, уровни воды и глубины) по трем рассматриваемым сценариям, и сделаны выводы о степени влияния существующих в настоящее время в левобережной пойме р. Кондома сооружений на форму свободной поверхности, а также произведен прогноз такого влияния в результате строительства новой противопаводковой дамбы на левой пойме реки.

Ключевые слова:

Противопаводковые дамбы, численное моделирование, зоны затопления, двумерные гидравлические модели, имитационные модели, моделирующая система HEC-RAS.

Введение

Издrevле поймы рек у всех народов планеты считались наиболее привлекательными с точки зрения размещения поселений. Близость к источнику воды, богатым и плодородным пойменным почвам во многом являлась и является по сей день определяющим фактором в экономическом и социальном развитии человеческих сообществ. Мало что изменилось и в настоящее время, разве что более усилилась человеческая экспансия по отношению к водным ресурсам, которые в настоящее время, как никогда ранее, стали приобретать свою истинную ценность.

С развитием промышленности и технологий ежегодно возникает все более сильная потребность в ресурсах, а именно в полезных ископаемых, которые, как известно, являются невозобновляемым ресурсом. В то же время новых, «удобных» для разработки месторождений, мест с каждым поколением становится все меньше. В этих условиях часто прибегают к добыче полезных ископаемых в труднодоступных местах. Что касается разработки угольных месторождений вблизи

водных объектов (малых, средних и больших рек), то основная сложность заключается не в физической возможности добыть сырье, а в способности организовать добычу и производство таким образом, чтобы оно учитывало интересы различных слоев общества, соответствовало требованиям к безопасности и в то же время имело наименьшее негативное воздействие на водный объект либо не имело его вовсе [1]. В данном контексте особое значение приобретает разработка различных мероприятий по инженерной защите территории от затопления в период половодий и паводков на реках, в частности, строительство ограждающих противопаводковых дамб [2].

Однако у любой технологии всегда имеется обратная сторона, и, применительно к рекам, это гидравлическое влияние строительства дамб на уровень и скоростной режим рек. В последние годы интерес к необходимости определения границ зон затопления рек в нашей стране увеличился в связи с Постановлением Правительства РФ от 18.04.2014 г. № 360 [3]. Довольно слабо освещенным при этом

остается вопрос по учету воздействий различных гидротехнических сооружений в поймах рек на водный поток и форму зоны затопления [4].

С развитием технологий, улучшением ситуации с доступностью вычислительных мощностей для рядовых исследователей, совершенствованием алгоритмов вычисления [5–7], приходом на помощь гидрологам различного рода геоинформационных систем и методов с ними связанных [8] данная задача все чаще решается методами имитационного моделирования речной гидравлики [9–11] при помощи моделирующих систем [12] и так называемого геоинформационного моделирования наводнений (ГИС-моделирование наводнений) [13, 14]. Ранее автором был выполнен обзор некоторых существующих подходов по моделированию зон затоплений [15].

В ряде зарубежных и отечественных работ, посвященных тематике влияния противопаводковых защитных дамб на гидравлические параметры речных потоков [16–20] во многом освещается данная проблематика.

Целью данной работы, в практическом смысле, является демонстрация влияния строительства инженерных гидротехнических сооружений (защитных противопаводковых дамб) на изменение характеристик водного потока, выполненная на примере реально существующих проектных решений в пойме р. Кондома в условиях прохождения паводка редкой вероятности превышения (в данной работе рассмотрена вероятность 1 %). Технически данная цель достигается методом численного 2D моделирования гидравлики открытых потоков на базе моделирующей системы HEC-RAS 5.0.5.

Исследуемая территория и постановка задачи

Постановка задачи. В 2018 г. силами ООО «СибирьГидроТехПроект» (г. Томск) в интересах ООО «Шахта Тайлепская» был произведен комплекс инженерно-изыскательских работ, а также небольшое исследование, с помощью которого необходимо было ответить на вопрос, как повлияет разработка месторождения с размещением объектов строительства и сооружений по инженерной защите территории от затопления, расположенных непосредственно в левой пойме р. Кондома, на изменение максимальных уровней воды и скоростного поля потока на данном участке.

Объект исследования расположен в Новокузнецком районе Кемеровской области, в 2 км восточнее п. Тайлеп. Рассматриваемый участок р. Кондома расположен между пос. Малиновка и г. Калтан.

Предприятие выступило инициатором проведения данной работы по причине того, что жители окрестных населенных пунктов были обеспокоены тем, как может повлиять предполагаемое строительство объектов в пойме и еще одной, в дополнение к уже имеющейся, защитной дамбы на левом берегу р. Кондома. Беспокойство населения подкреплялось тем фактом, что в 2004 г. на данном участке имело место катастрофическое наводнение в результате прохождения волны половодья, осложненной высокой дружностью этого половодья, дождевыми паводками и иными факторами. Тогда пострадало большое количество частных домовладений, были и человеческие жертвы.

Поэтому была поставлена задача смоделировать процесс прохождения максимального расхода воды низкой вероятности превышения при различных условиях (сценариях). Расчетная вероятность превышения максимального расхода воды весеннего половодья в связи с уровнем ответственности и классом гидротехнического сооружения была выбрана равной 1 % (один случай за 100 лет). В качестве модельных приняты три сценария: когда пойма реки относительно не нарушена и в ней отсутствуют противопаводковые дамбы и отвал вскрышной породы (сценарий № 1), при наличии в пойме существующей в настоящее время одной противопаводковой дамбы и породного отвала (сценарий № 2), при наличии в пойме всех существующих в сценарии № 2 объектов и проектируемой противопаводковой дамбы (сценарий № 3).

Далее, сценарий 1 будем называть контрольным, сценарий 2 – фактическим, а сценарий 3 – проектным сценарием.

Материалы и методы исследования

Создание модели. На первом этапе исходная топографическая съемка подверглась предварительной обработке и подготовке в системе автоматизированного проектирования (САПР) Autodesk Civil 3D с тем, чтобы удалить со съемки лишние данные и артефакты (различные ошибки в построении горизонталей и т. п.) и создать поверхность триангуляции для ее экспорта и дальнейшей обработки. На рис. 1 изображена подготовленная к экспорту поверхность.

На втором этапе подготовленная поверхность на основе нерегулярной сетки была экспортирована из САПР Civil 3D в формате geotiff для последующей обработки в ГИС-системе SAGA GIS.

С помощью системы SAGA GIS поверхность подвергалась дополнительной постобработке с целью удаления лишних шумов и ячеек с отсутствующими данными (no data), а также осуществлялся ее перевод из исходной системы координат в систему WGS84 в проекции UTM (универсальная проекция Меркатора). Поверхность, обработанная в системе SAGA GIS, изображена на рис. 2.

На третьем этапе подготовленная цифровая модель рельефа (ЦМР) была импортирована в моделирующую систему HEC-RAS, где с помощью инструментария RAS-Mapper в нее были внесены результаты промеров по поперечникам в русле р. Кондома, а затем поверхность была пересчитана с учетом внедрения этих данных. Итоговая рабочая ЦМР без нанесения существующих и проектируемых объектов для сценария 1 изображена на рис. 3.

На четвертом этапе были разработаны и внедрены в готовую ЦМР необходимые объекты поверхности: существующий отвал с существующей защитной дамбой и проектируемая защитная дамба. Процесс разработки дополнительных поверхностей рассматриваемых объектов аналогичен описанным выше трем этапам. Измененные с учетом существующих в пойме и проектируемых объектов для сценариев 2 и 3, поверхности представлены на рис. 4, 5.

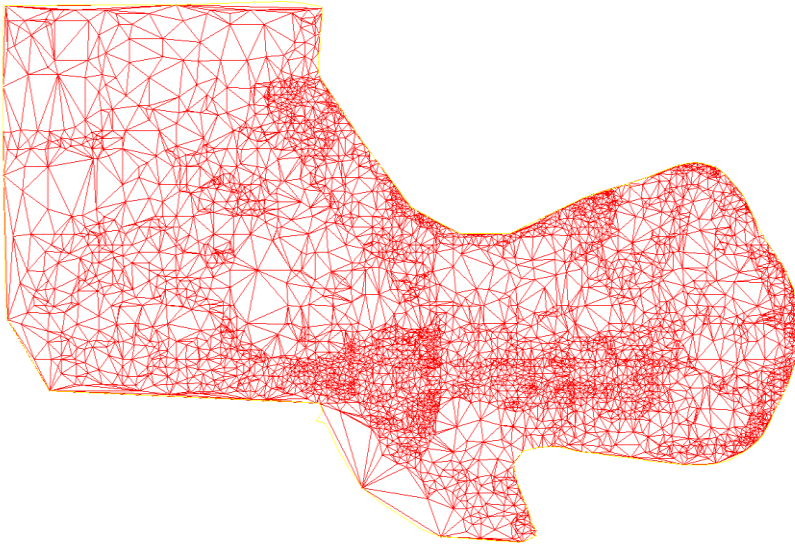


Рис. 1. Подготовленная в САПР Civil 3D поверхность триангуляции
Fig. 1. Triangulation surface made in CAD Civil 3D

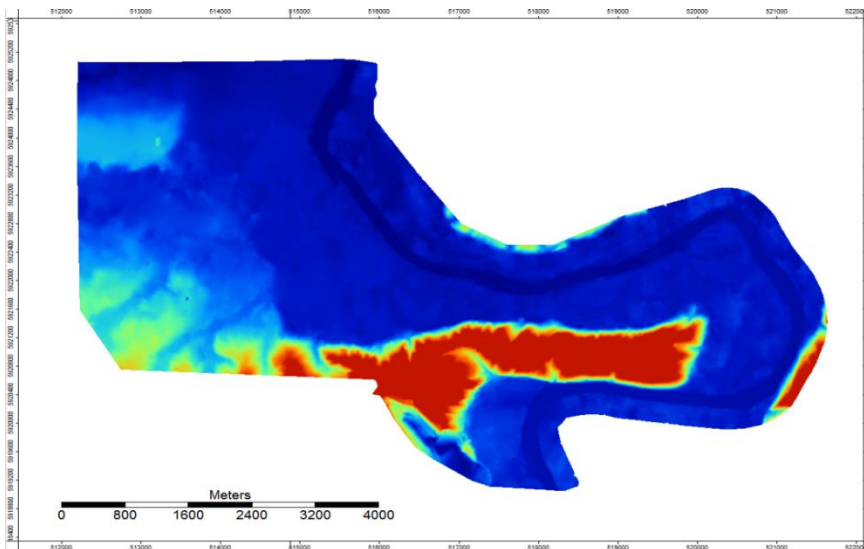


Рис. 2. Обработанная в SAGA GIS цифровая модель рельефа
Fig. 2. Digital elevation model processed in SAGA GIS

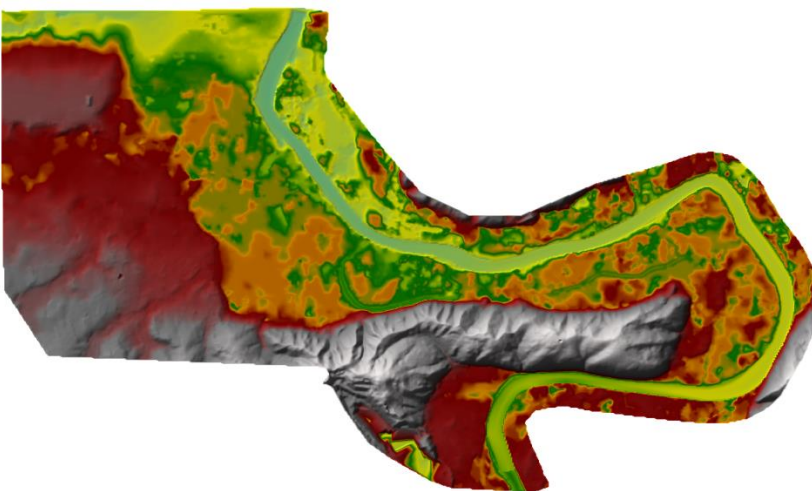


Рис. 3. Рабочая ЦМР в системе HEC-RAS без нанесения объектов в пойме для сценария 1
Fig. 3. Operating DEM (digital elevation model) in the HEC-RAS system without the objects in the floodplain for Scenario 1

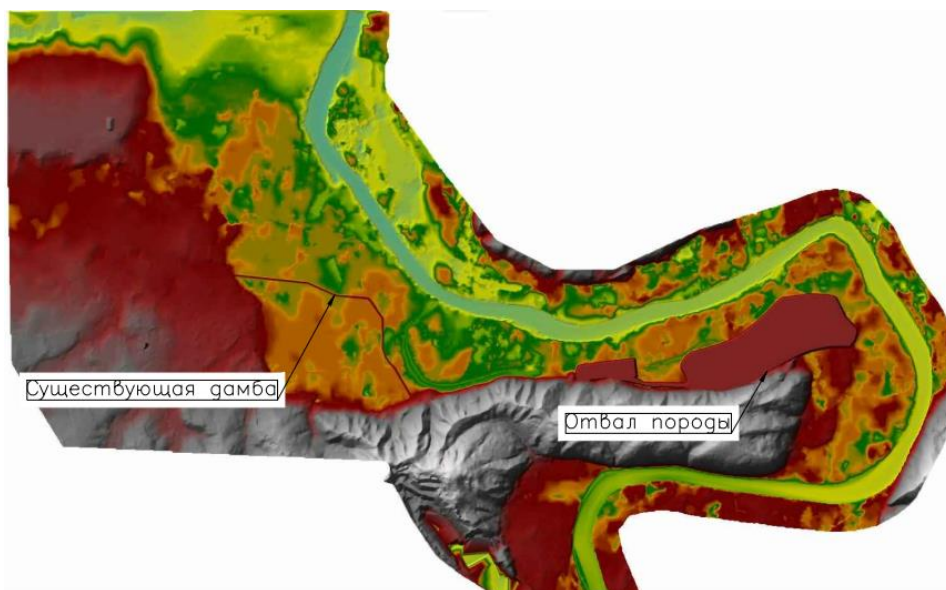


Рис. 4. Рабочая ЦМР с нанесением существующих объектов в пойме реки (защитная дамба и породный отвал) для сценария № 2 в системе HEC-RAS

Fig. 4. Operating DEM with already existing objects in the floodplain (a flood control dam and overburden dump) for Scenario 2 in the HEC-RAS system

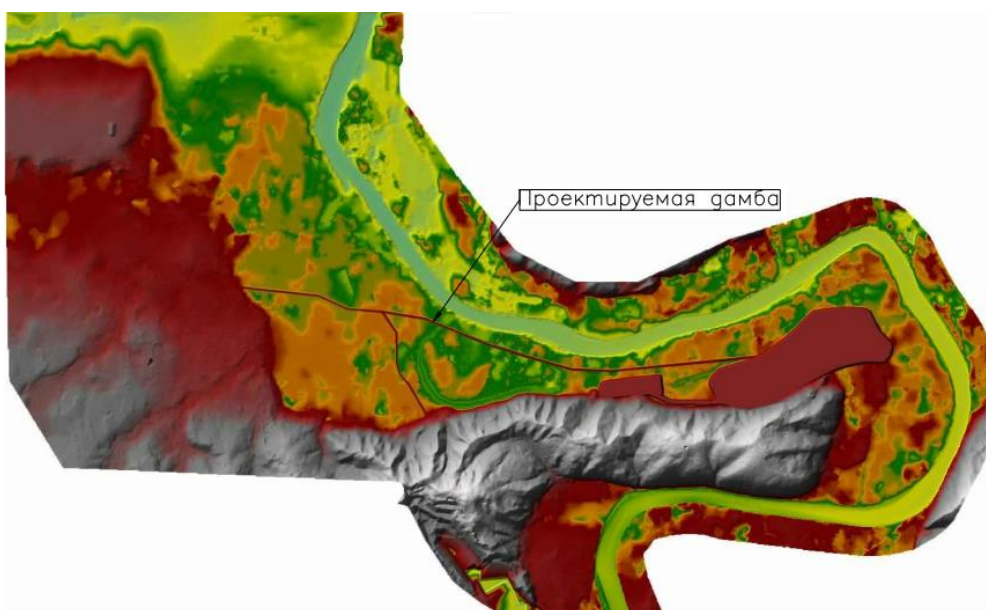


Рис. 5. Рабочая ЦМР с нанесением существующих объектов в пойме реки (защитная дамба и породный отвал) и проектируемой защитной дамбы для сценария № 3 в системе HEC-RAS

Fig. 5. Operating DEM with already existing objects in the floodplain (a flood control dam and overburden dump) and designed flood control dam for Scenario 3 in the HEC-RAS system

Калибровка модели

Калибровка модели выполнялась путем принятия на начальном этапе стандартных для поймы и русла коэффициентов шероховатости [21, 22] и последующей их корректировки с целью добиться максимального соответствия выходных данных модели с данными инструментальных измерений.

Калибровка на межженных условиях. Для решения данной задачи 18.07.2018 г. было произведено нивелирование уреза свободной поверхности р. Кондома вдоль участка моделирования и получены отметки уровня на входном створе модели – 222,50 м БС (Бал-

тийская система высот), в замыкающем створе модели – 217,31 м БС. Измеренный расход воды на момент проведения работ составил 21,50 м³/с.

Измеренный расход воды при заданных начальных условиях пропускался через модель, а затем, путем множественных итераций с корректировкой коэффициентов шероховатости, временного шага, изменением размера расчетной ячейки и других параметров, достигалось наилучшее согласование смоделированных и измеренных уровней воды. Результаты калибровки модели приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты калибровки модели в меженных условиях

Table 1. Results of model calibration in land survey conditions

Створ Cross-section	Калибровочный расход, м ³ /с Calibration flow rate, m ³ /s	Измеренный уровень, м БС Measured level mark, m a.s.l. (above sea level)	Смоделированный уровень, м БС Simulated level mark, m a.s.l. (above sea level)	Ошибка расчета, м Error, m
Входной створ/Entrance	21,50	222,50	222,36	0,14
Замыкающий створ/Exit	21,50	217,31	217,15	0,16

Калибровка в условиях прохождения половодья. Для решения этой задачи были получены данные о максимальных наблюдаемых уровнях воды по гидропосту Кузедеево во время прохождения пика половодья в 2004 г. Отметка уровня воды составила 233,34 м БС. Расстояние по руслу реки до входного и замыкающего створа модели составило 11,3 и 25,4 км соответственно. Расчетная отметка максимального уровня воды 2004 г. была передана вниз по течению реки по среднему уклону водной поверхности (получен на основе нивелировки в период обследования в меженный период) на участке от гидропоста до участка моделирования, включая входной и замыкающий створы. В результате на входном створе модели переданная отметка уровня составила 229,93 м БС, а в замыкающем – 223,97 м БС. Калибровка осуществлялась

при двух допущениях: (1) калибровочный наблюдаемый расход, равный 3560 м³/с, введенный в модель, за неимением непосредственных наблюдений на входном створе, принят по данным гидропоста в п. Кузедеево с допущением, что приращение водосборной площади между гидропостом и участком моделирования не даст значимого увеличения данной цифры, (2) уклон свободной поверхности принят на основе его измерений в меженный период, так как работа производилась в летний период и другими данными автор не располагал. Результаты калибровки модели приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты калибровки модели в условиях прохождения половодья

Table 2. Results of model calibration in the conditions of flood

Створ/Cross-section	Калибровочный расход, м ³ /с Calibration flow rate, m ³ /s	Измеренный уровень, м БС Measured level mark, m a.s.l.	Смоделированный уровень, м БС Simulated level mark, m a.s.l.	Ошибка расчета, м Error, m
Входной створ/Entrance	3800	229,34	229,46	0,12
Замыкающий створ/Exit	3800	224,38	224,55	0,17

Смоделированная на калибровочный расход зона затопления и расчетное поле скоростей потока, в условии прохождения половодья 2004 г., приведены на рис. 6, 7.



Рис. 6. Смоделированная зона затопления р. Кондома в условиях половодья 2004 г.

Fig. 6. Simulated flood zone of the Kondoma River in flood conditions of 2004

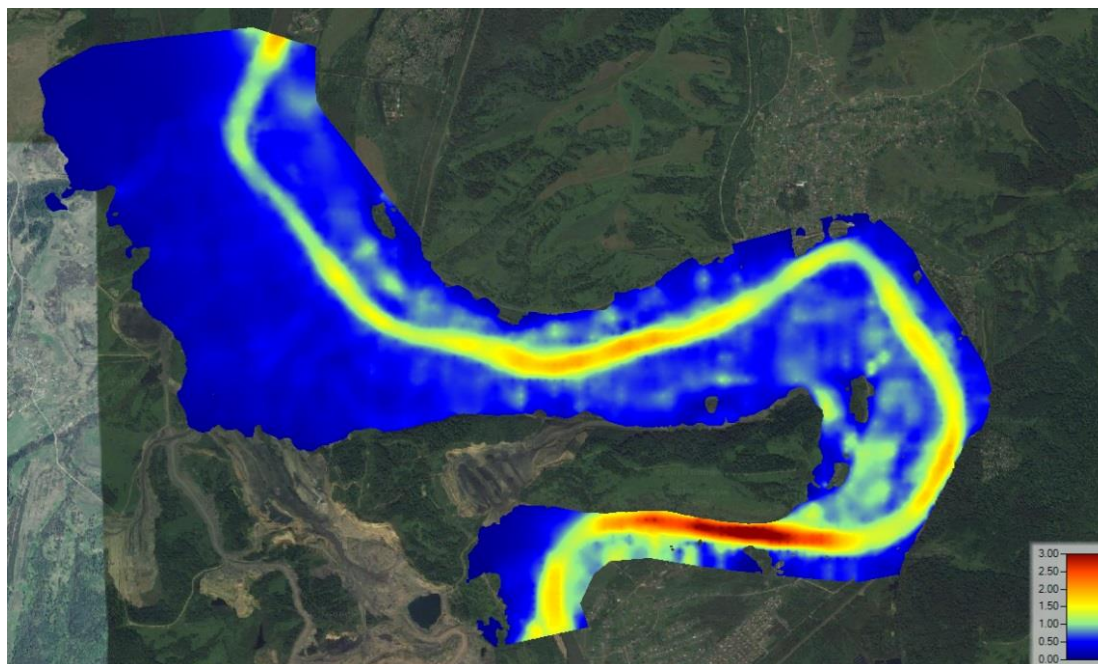


Рис. 7. Смоделированное поле скоростей потока р. Кондома в условиях половодья 2004 г.

Fig. 7. Simulated water velocity field in the Kondoma River in flood conditions of 2004

Настройка модели, граничные условия

Следующим, после калибровки, шагом является настройка и пуск модели на расчетный максимальный расход воды. В качестве граничных условий в верхнем (входном) створе участка моделирования был задан гидрограф стока, смоделированный с учетом повышающего коэффициента так, чтобы в пиковой точке достигалось расчетное значение 1 % обеспеченности расхода воды, который принят, по результатам гидрологических расчетов, равным $4191 \text{ м}^3/\text{с}$. За основу модельного гидрографа принят наблюдаемый

гидрограф стока р. Кондома по данным гидропоста в п. Куздеево за 2004 г. (когда наблюдался близкий к 3 % обеспеченности расход воды).

Ординаты наблюдаемого гидрографа были умножены на повышающий коэффициент, который равен отношению расчетного расхода 1 % обеспеченности к максимальному расходу, наблюдаемому в 2004 г. и равному $3560 \text{ м}^3/\text{с}$. Повышающий коэффициент модели гидрографа составляет 1,18. Смоделированный гидрограф половодья, заданный в качестве граничного условия, приведен на рис. 8.

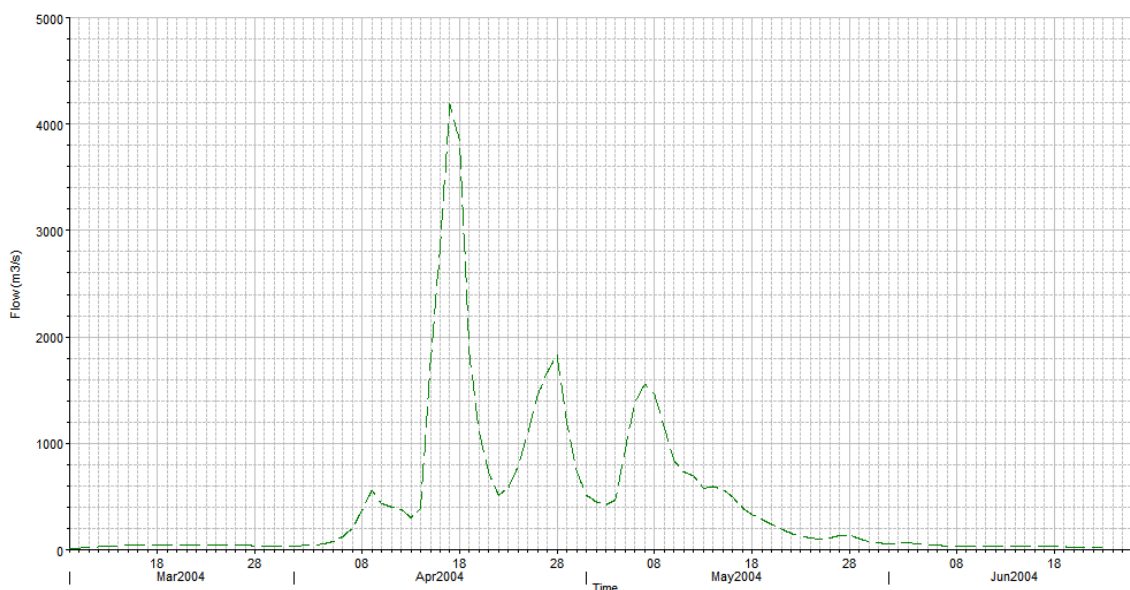


Рис. 8. Смоделированный гидрограф стока р. Кондома во входном створе при обеспеченности 1 %

Fig. 8. Simulated hydrograph of the runoff of the Kondoma River at the entrance cross-section corresponding to the 1 % occurrence

В нижнем (замыкающем) створе граничные условия задавались измеренным уклоном свободной поверхности, который на рассматриваемом участке составил 0,00040, или 0,40 ‰ и был получен в период рекогносцировочного обследования в июне 2017 г.

Анализ чувствительности модели к изменению уклона свободной поверхности

Одной из определяющих характеристик потока, которая может существенно влиять на результат моделирования, является уклон водной поверхности. В рассматриваемой симуляции одним из недостатков является отсутствие исходных данных по реальному уклону водной поверхности р. Кондома на моделируемом участке в многоводный период. Так как модель настраивалась на основе измеренного уклона водной поверхности в меженный период, то необходимо изучить ее чувствительность к изменению уклона в большую и меньшую сторону.

Для этих целей на основе каждого из рассматриваемых сценариев модель была испытана при мини-

мальном и максимальном уклоне. В условиях отсутствия прямых измерений за минимальный принят уклон водной поверхности, соответствующий среднему уклону на моделируемом участке р. Кондома, снятом с топографических карт масштаба 1:25000 и составляющем 0,00030, или 0,30 ‰. В качестве максимального уклона водной поверхности был использован уклон, полученный путем восстановления отметок максимального уровня воды на двух гидрологических постах – в п. Кузедеево, где он составил 231,38 м БС, и в г. Калтан, где за данную дату зафиксирован уровень воды, соответствующий отметке 218,42 м БС. В г. Калтан располагается водомерный пост ПАО «ЮК ГРЭС», расстояние между постами составляет 30,68 км. Таким образом, максимальный уклон водной поверхности на рассматриваемом участке составляет 0,00042, или 0,42 ‰, что практически идентично уклону, измеренному в июне 2017 г. и принятому для модели в качестве расчетного.

Результаты анализа чувствительности приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты анализа чувствительности модели
Table 3. Results of model sensitivity analysis

Створ/Cross-section	Уровень воды по сценарию, м БС Water level according to Scenario, m a.s.l.		
	1	2	3
Уклон водной поверхности (мин./ измеренный/макс.), ‰ Channel slope min./measured/max.), ‰	0,30/0,40/042	0,30/0,40/042	0,30/0,40/042
Входной створ/Entrance	229,72/229,68/229,65	229,77/229,74/229,72	229,78/229,77/229,76
Верхний створ проектируемой дамбы Upper range of the designed dam	226,37/226,15/226,13	226,91/226,21/226,20	226,44/226,39/226,37
Нижний створ проектируемой дамбы Lower range of the designed dam	225,66/225,22/225,17	225,70/225,25/225,21	225,66/225,22/225,15
Замыкающий створ/Exit	225,46/224,93/224,85	225,47/224,94/224,85	225,47/224,94/224,86

Проведенный анализ чувствительности модели к изменению уклона водной поверхности показал, что отклик модели на изменение уклона существует и, в рамках принятого «коридора изменения» данной величины, в диапазоне от 0,00030 до 0,00042, смоделированная отметка уреза водной поверхности может отклоняться максимально на 0,62 м. Причем характер влияния таков, что наибольшая разница отметок урезом, рассчитанная при различных значениях уклонов, достигается в замыкающем створе. Это связано с тем, что величина уклона является одним из граничных условий модели. В рассматриваемом случае диапазон изменения уклонов водной поверхности довольно узкий, а уклон реки в многоводный период незначительно отличается от измеренного в меженный период, поэтому данное отклонение практически никак не повлияет на точность результатов моделирования. Однако из проведенной проверки чувствительности следует важный вывод о том, что при таком способе настройки модели, когда уклон водной поверхности является одним из граничных условий, исследуемый участок рекомендуется помещать как можно ближе ко входному створу, чтобы таким образом достигнуть минимальной погрешности в расчетах.

Результаты моделирования

Моделирование производилось по трем расчетным сценариям: квази-естественное состояние русла и

поймы р. Кондома до начала строительства – *сценарий 1 (контрольный)*, фактическое состояние русла и поймы с учетом существующей дамбы и породного отвала – *сценарий 2 (фактический)*, состояние русла и поймы с учетом существующих объектов и проектируемой дамбы – *сценарий 3 (проектный)*.

Сценарий 1. В результате численного моделирования в ненарушенных условиях поймы при отсутствии существующих на тот момент сооружений были получены расчетные зона затопления (рис. 9), поле скоростей и направлений течения (рис. 10), поле глубин потока (рис. 11).

В результате численного моделирования по сценарию 1 на участке проектируемой дамбы были получены отметки уровня воды, равные для начала дамбы – 226,15 м БС, для точки ее примыкания к существующей дамбе 225,22 м БС.

Сценарий 2. В результате численного моделирования рассматриваемого участка в современных условиях, при наличии в пойме существующего породного отвала и защитной дамбы, были получены: расчетная зона затопления (рис. 12), поле распределения скоростей и направлений течения (рис. 13), расчетное поле глубин потока (рис. 14). Существующие объекты в пойме показаны красным цветом.



Рис. 9. Расчетная зона затопления при прохождении расхода воды 1 % обеспеченности в ненарушенных условиях левой поймы (сценарий 1)

Fig. 9. Estimated flood zone at water discharge of 1 % occurrence in undisturbed conditions in the left floodplain (Scenario 1)

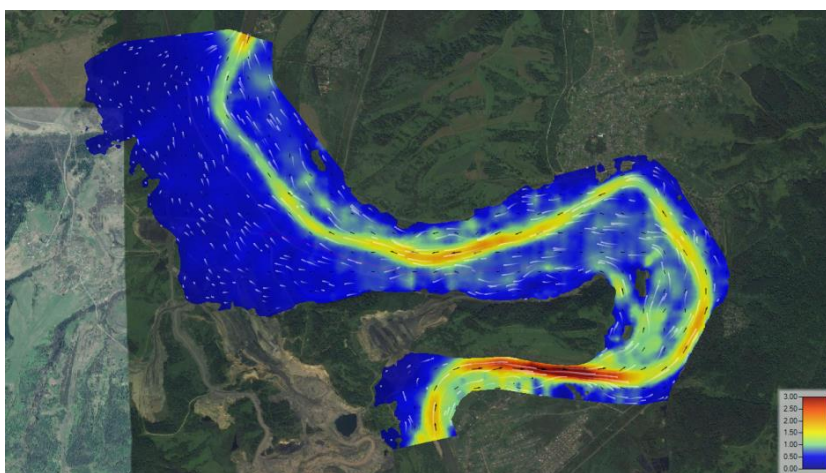


Рис. 10. Расчетное поле скоростей и направлений течения потока при прохождении расхода воды 1 % обеспеченности в ненарушенных условиях левой поймы (сценарий 1)

Fig. 10. Estimated flow velocity and stream directions field at water discharge of 1 % occurrence in undisturbed conditions in the left floodplain (Scenario 1)

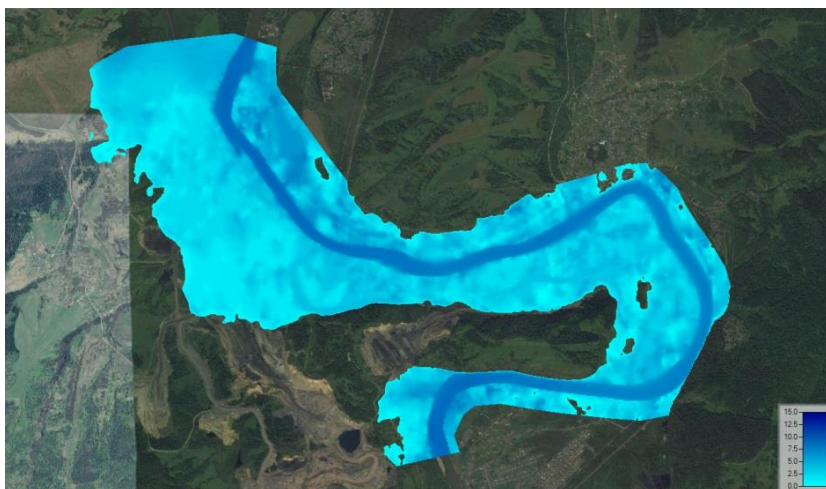


Рис. 11. Расчетное поле глубин потока при прохождении расхода воды 1 % обеспеченности в ненарушенных условиях левой поймы (сценарий 1)

Fig. 11. Estimated flow depth field at water discharge of 1 % occurrence in undisturbed conditions in the left floodplain (Scenario 1)

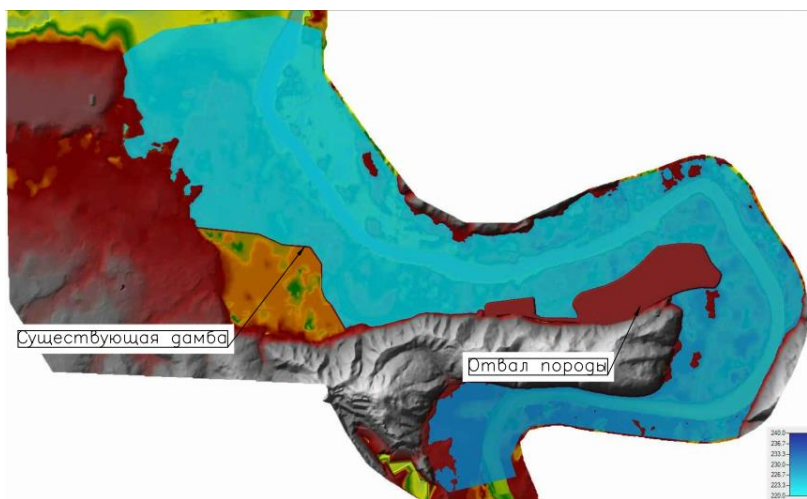


Рис. 12. Расчетная зона затопления при прохождении расхода воды 1 % обеспеченности в современных условиях (сценарий 2)

Fig. 12. Estimated flooded area at water discharge of 1 % occurrence in current conditions (Scenario 2)

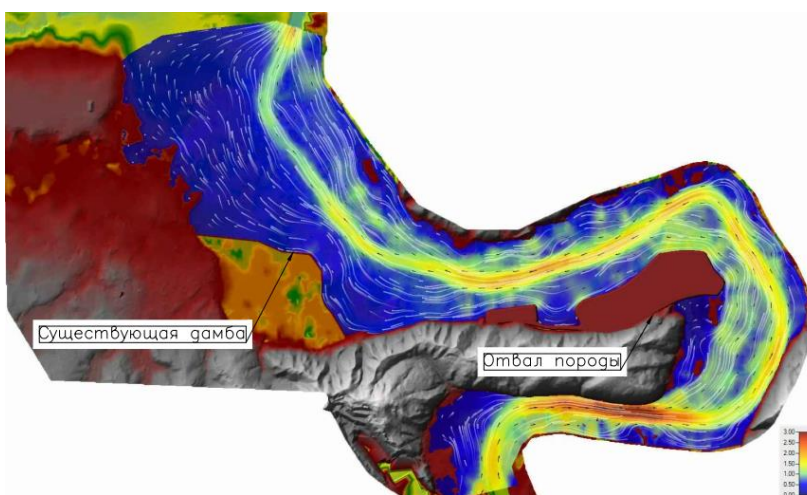


Рис. 13. Расчетное поле скоростей потока при прохождении расхода воды 1 % обеспеченности в современных условиях (сценарий 2)

Fig. 13. Estimated flow velocity and stream directions field at water discharge of 1 % occurrence in current conditions (Scenario 2)

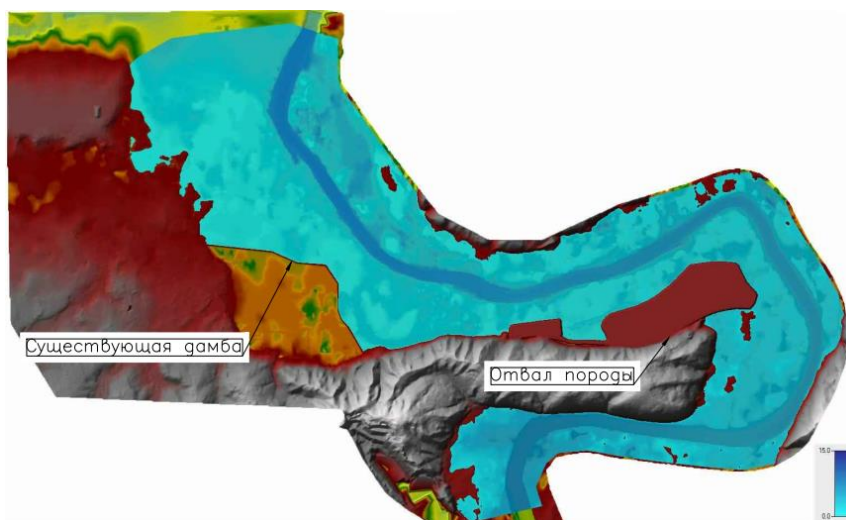


Рис. 14. Расчетное поле глубин потока при прохождении расхода воды 1 % обеспеченности в современных условиях (сценарий 2)

Fig. 14. Estimated flow depth field at water discharge of 1 % occurrence in current conditions (Scenario 2)

В результате численного моделирования по сценарию 2 на участке проектируемой дамбы были получены отметки уровня воды, равные для начала дамбы – 226,21 м БС, для точки ее примыкания к существующей дамбе – 225,25 м БС.

Результаты моделирования, по сравнению с контрольным сценарием, показывают незначительное увеличение уровня воды в районе начала проектируемой дамбы – до 6 см, в нижнем створе, а в точке примыкания проектируемой дамбы к существующей – до 3 см. Данное увеличение уровня воды, очевидно, вызвано подпорным влиянием построенных в пойме

объектов (дамбы и отвала), которые создают сужающий эффект для потока и увеличивают шероховатость поймы в целом, оказывая влияние на общую пропускную способность русла – поймы.

Сценарий 3. В результате моделирования рассматриваемого участка в условиях существования проектируемой защитной дамбы вместе с существующим породным отвалом и защитной дамбой были получены: расчетная зона затопления (рис. 15), поле распределения скоростей и направлений течения (рис. 16), расчетное поле глубин потока (рис. 17). Существующие и проектируемые объекты отмечены выносками.

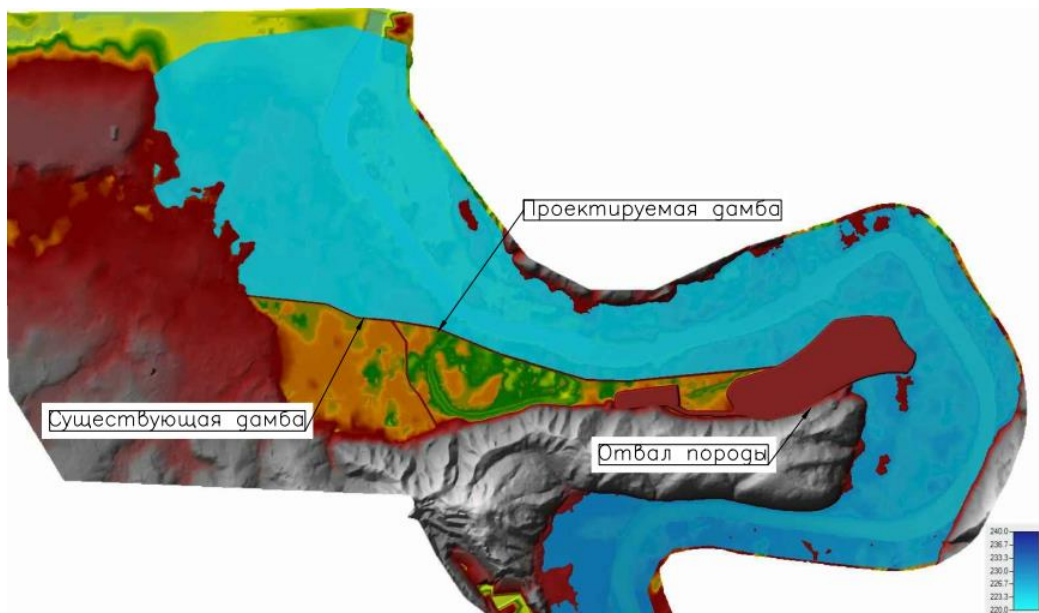


Рис. 15. Расчетная зона затопления при прохождении расхода воды 1 % обеспеченности при проектных условиях (сценарий 3)

Fig. 15. Estimated flooded area at water discharge of 1 % occurrence in design conditions (Scenario 3)

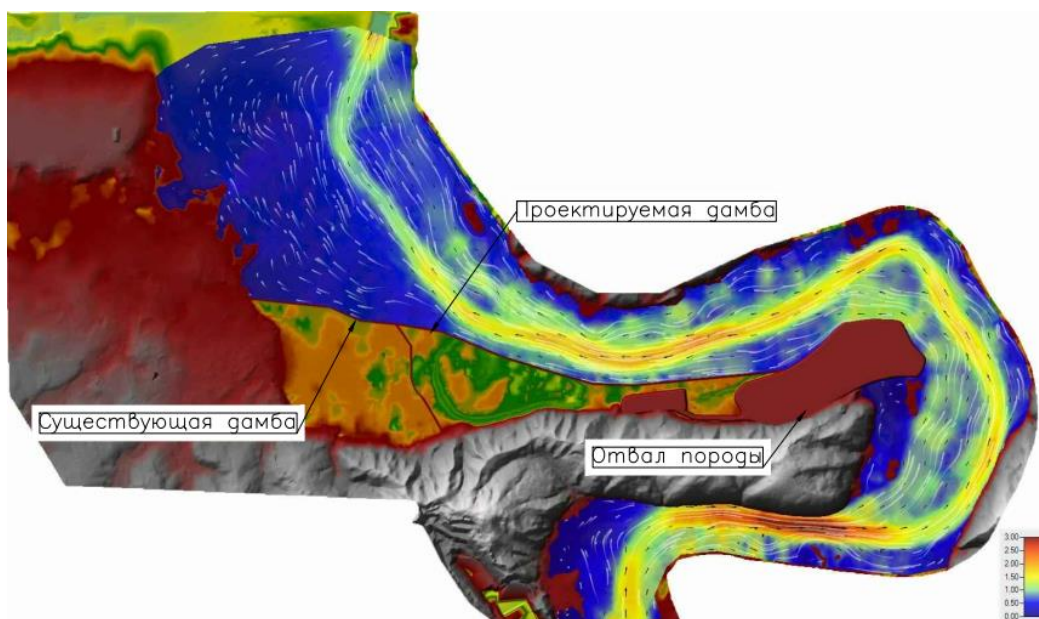


Рис. 16. Расчетное поле скоростей и направлений течения потока при прохождении расхода воды 1 % обеспеченности в проектных условиях

Fig. 16. Estimated flow velocity and stream directions field at water discharge of 1 % occurrence in design conditions

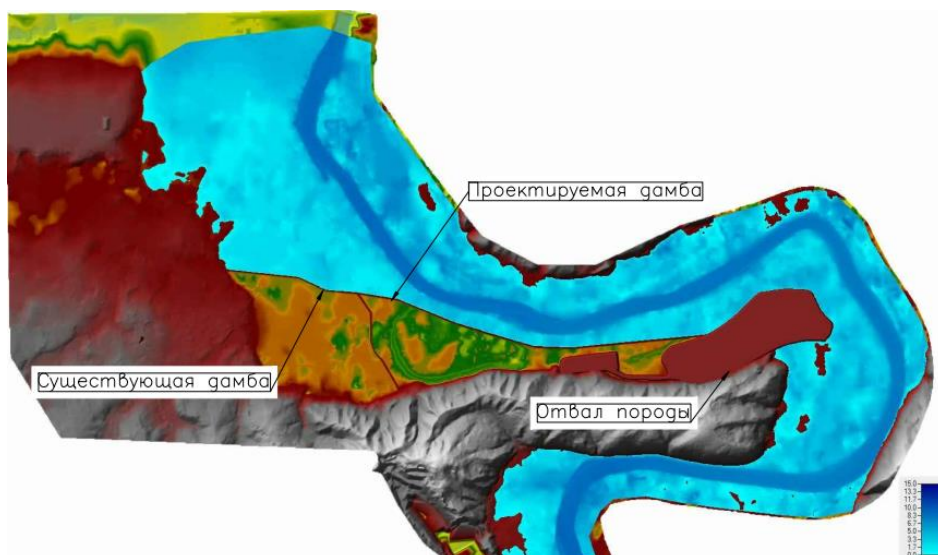


Рис. 17. Расчетное поле глубин потока при прохождении расхода воды 1 % обеспеченности в проектных условиях
Fig. 17. Estimated flow depth field at water discharge of 1 % occurrence in design conditions

В результате численного моделирования по сценарию 3 на участке проектируемой дамбы были получены отметки уровня воды, равные для начала дамбы – 226,39 м БС, для точки ее примыкания к существующей дамбе – 225,21 м БС.

Результаты численного моделирования, в сравнении с контрольным сценарием 1 и фактическим сценарием 2, приведены в табл. 4.

Эффект влияния строительства в левой пойме р. Кондома при прохождении максимального расхода воды 1 % обеспеченности по сравнению с естественным состоянием русла–поймы (при отсутствии существующих и проектируемых сооружений) можно оценить по форме смоделированных кривых свободной поверхности, представленных на рис. 18.

Таблица 4. Результаты калибровки модели в условиях прохождения половодья

Table 4. Results of model calibration in the conditions of flood

Створ/Cross-section	Уровень воды по сценарию, м БС Water level according to Scenario, m a.s.l.		
	1	2	3
Верхний створ проектируемой дамбы Upper range of the designed dam	226,15	226,21	226,39
Нижний створ проектируемой дамбы Lower range of the designed dam	225,22	225,25	225,22

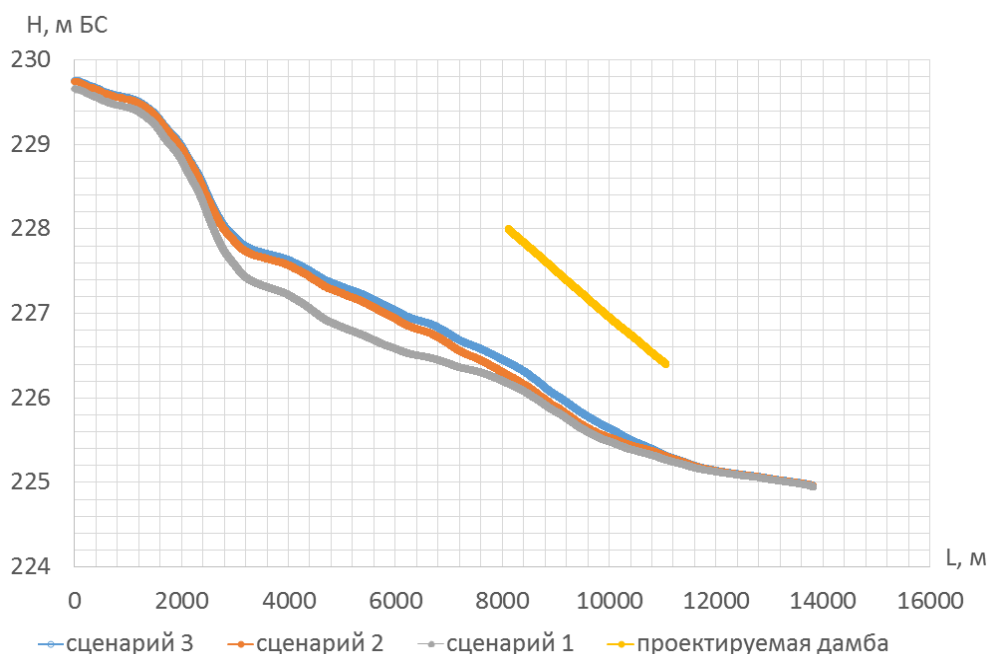


Рис. 18. Кривые свободной поверхности р. Кондома по трем сценариям при обеспеченности 1 %
Fig. 18. Curves of free surface of the Kondoma river according to three scenarios at 1 % occurrence

Обсуждение

Анализ результатов моделирования по рассмотренным сценариям показывает, что подъем уровня воды в верхнем створе проектируемой дамбы в сравнении с естественным состоянием составит до 22 см, а по сравнению с фактическим состоянием – до 18 см, в нижнем же створе по сравнению с естественным состоянием повышение уровня не ожидается либо ожидается крайне незначительным – около 1–2 см, а в сравнении с фактическим состоянием даже меньше 3 см. Некоторое снижение уровня воды в нижнем створе проектируемой дамбы по сравнению со вторым сценарием, вероятно, вызвано тем, что при наличии этой дамбы снизятся боковые сопротивления потоку со стороны отвала и существующей дамбы, которые в настоящее время, благодаря своей форме, могут образовывать значительные «мертвые» пространства в пойме, меняя таким образом величину скоростей и направления течений.

В целом результаты численного моделирования показывают наличие влияния строительства дамб в пойме р. Кондома на изменение уровня воды и скоростей потока, однако оно сравнительно небольшое. Схожие результаты были получены учеными из ИВЭП СО РАН А.Т. Зиновьев, К.Б. Кошелев, К.В. Марусин в работе [23], где на примере участка р. Лены ими было показано, что изменения поля глубин и скоростей потока при строительстве защитной дамбы окажутся незначительными, в особенности по сравнению с ущербом, который может причинить наводнение.

Выводы

По результатам моделирования трех рассматриваемых сценариев можно сделать следующие выводы.

1. При реализации контрольного сценария 1 происходит полное затопление левосторонней поймы р. Кондома и ведение хозяйственной деятельности в таких условиях было бы затруднено или невозможно.
2. Строительство противопаводковых дамб значительно сокращает площадь зоны затопления пой-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Socio-hydrology: conceptualising human-flood interactions / G. Di Baldassarre, A. Viglione, G. Carr, L. Kuil, J.L. Salinas, G. Bloschl // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2013. – V. 17. – P. 3295–3303.
2. Гидрология и гидротехнические сооружения / Г.Н. Смирнов, Е.В. Курлович, И.А. Витрешко, И.А. Мальгина. – М.: Изд-во «Высшая школа», 1988. – 472 с.
3. Постановление Правительства РФ от 18.04.2014 г. № 360. – М., 2014.
4. Варенцова Н.А., Никифоров Д.А., Гранич П.С. Нормативно-правовые основы проектов определения границ зон затопления и существующие проблемы // *Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: Материалы докладов XIV Общероссийской научно-практической конференции и выставки*. – М., 2018. – С. 194–196.
5. Ковеня В.М., Чирков Д.В. Методы конечных разностей и конечных объемов для решения задач математической физики. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского государственного университета, 2013. – 87 с.

мы и позволяет функционировать объектам угледобывающего комплекса.

3. В общем случае при реализации сценариев 1, 2 наблюдается тенденция повышения уровня воды на участке, где размещены существующие объекты, что, с большой вероятностью, связано с сужением живого сечения пойменной части потока и формированием подпорного эффекта, причем наибольший подпорный эффект наблюдается на участке расположения существующего отвала.
4. Уровень воды при реализации всех рассмотренных сценариев увеличивается в следующем порядке – сценарий 1 – сценарий 2 – сценарий 3, то есть с каждым новым объектом в пойме реки увеличиваются сопротивления потоку и подпорный эффект, а вследствие этого, и уровни воды. Однако данный вывод может являться лишь частным случаем, так как из общих основ гидравлики известно, что сужение потока не всегда приводит к увеличению уровня, при определенных обстоятельствах возможен и обратный эффект.
5. При реализации проектных решений по строительству новой защитной дамбы максимальный кумулятивный эффект влияния всех учитываемых в модели объектов на уровень воды в сравнении с естественными условиями выражается в максимальном подъеме уровня воды, равном 45–50 см, на участке строительства новой дамбы, так как именно в этом месте происходит максимальный эффект сужения потока.
6. Повышение уровня воды в результате строительства проектируемой дамбы по сравнению с фактическим состоянием поймы (при наличии существующей дамбы и отвала) прогнозируется незначительным, максимальное его значение составило от 7 до 15 см.
7. При реализации проектных решений по строительству новой дамбы максимальные скорости потока в прилегающих к дамбе областях и в русле увеличатся в среднем на 0,1–0,3 м/с, что должно быть учтено при выборе материала дамбы и ее конструктивных особенностей.
6. Ле Меоте Б. Введение в гидродинамику и теорию волн на воде. – Л.: Изд-во «Гидрометеиздат», 1974. – 368 с.
7. Bates P.D., Lane S.N., Ferguson R.I. Computational fluid dynamics: applications in environmental hydraulics. – Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2005. – 531 p.
8. Пьянков С.В., Шихов А.Н. Геоинформационное обеспечение моделирования гидрологических процессов и явлений. – Пермь: Изд-во Перм. гос. нац. исслед. ун-та, 2017. – 148 с.
9. Hydraulic modeling of flow, water levels and inundations: Serein River case study / S.M. Saleh, A. Ducharme, L. Oudin, N. Flipo, E. Ledoux // *PIREN-Seine*. – Paris, 2009. – P. 1–48.
10. Flood modeling using a synthesis of multi-platform LiDAR data / J.D.Colby, A.B. Turner, R.M. Csontos, M. Batten // *Water*. – 2013. – V. 5. – P. 1533–1560.
11. Земцов В.А., Вершинин Д.А., Инишев Н.Г. Имитационное моделирование заторов (на примере р. Томь, Западная Сибирь) // *Лёд и Снег*. – 2014. – № 3. – В. 127. – С. 59–68.
12. Dyhouse G., Hatchett J., Benn J. Floodplain modeling using HEC-RAS. – Waterbury: Haestad press, 2003. – 744 p.
13. Кошель С.М., Энтин А.Л. Современные методы расчета распределения поверхностного стока по цифровым моделям рельефа // *Геоморфологи: Современные методы и технологии*

- цифрового моделирования рельефа в науках о Земле. – 2016. – В. 6. – С. 24–34.
14. Геоинформационное моделирование наводнений по материалам космической съемки (на примере г. Бийск, Алтайский край) / Б.А. Новаковский, О.Н. Колесникова, А.И. Прасолова, Р.В. Пермяков // Геоинформатика. – 2015. – В. 1. – С. 15–20.
 15. Романовский Р.В. Применение методов компьютерного моделирования зон затопления при максимальных расчетных уровнях воды для решения проектных задач при рекультивации нарушенных земель, а также проектировании зданий и сооружений вблизи водных объектов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 186–201.
 16. Heine R.A. Levee effects upon flood levels: an empirical assessment // Hydrological Processes. – 2012. – V. 26. – P. 3225–3240.
 17. Di Baldassarre G., Castellarin A., Brath A. Analysis of the effects of levee heightening on flood propagation: example of the River Po, Italy // Hydrological Sciences Journal. – 2009. – V. 54 (6). – P. 1007–1017.
 18. Yen B.C. Hydraulics and effectiveness of levees for flood control // Hydrometeorology, Impacts, and Management of Extreme Floods. – 1995. – V. 1. – P. 1–12.
 19. Оценка чувствительности характеристик затопления к изменениям природных и антропогенных факторов на основе двумерной гидродинамической модели / И.Н. Крыленко, П.П. Головлев, Е.Д. Корнилова, А.А. Сазонов, Е.А. Фингерг // Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии: Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова под редакцией О.М. Макарьевой. – СПб, 2018. – С. 898–902.
 20. Сазонов А.А., Крыленко И.Н., Головлев П.П. Оценка эффективности противопаводковых дамб с помощью методов математического моделирования (на примере реки Томь у города Междуреченска) // Природообустройство. – 2015. – № 4. – С. 73–76.
 21. Arcement G., Schneider V. Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains. U.S. Geological survey water supply paper 2339. – U.S.: Government printing office, 1989. – 38 p.
 22. Сазонов А.А., Крыленко И.Н. Анализ чувствительности двумерной гидродинамической модели к изменению коэффициента шероховатости // Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии: Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова под редакцией О.М. Макарьевой. – СПб, 2018. – С. 933–938.
 23. Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б., Марусин К.В. Использование компьютерного моделирования и ГИС-технологий для научного обоснования инженерных решений по предотвращению затопления пойм рек // Водные ресурсы России: современное состояние и управление: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. – Сочи, 8–14 октября 2018. – Новочеркасск: Лик, 2018. – Т. 2. – С. 98–105.

Поступила 05.05.2020 г.

Информация об авторах

Романовский Р.В., главный гидролог ООО «Сибирьгидротехпроект».

UDC 556.5.072

EFFECT OF FLOOD PROTECTION DAMS IN THE RIVER FLOODPLAIN ON FLOOD ZONE SHAPE, FLOW VELOCITY FIELDS AND WATER LEVELS ON THE EXAMPLE OF A NUMERICAL MODEL OF THE KONDOMA RIVER

Roman V. Romanovskiy,
keny146@gmail.com

LLC Sibirgidrotekhproekt,
7, Staro-Traktovaya street, Tomsk, 634510, Russia.

The relevance of numerical modeling of flood zones, characteristics of flow velocity field and marks of the river water levels is caused by the necessities of engineering practical work in development of mineral deposits, which are often situated in extremely difficult hydrographic conditions. In such conditions, the standard methods for calculating the mentioned characteristics do not allow us to achieve the desired result or do not take into account the whole variety of processes occurring in open flows, which are able to significantly affect the safe and trouble-free operation of the designed constructions.

The aim of the work is to show how the objects affect the change in the shape of the estimated flood zone, the flow velocity field, and water levels in conditions of constraining impact on the living cross-section of the flow during the passage of water rate of rare exceedance probability (1 % occurrence) on the example of the Kondoma river site and both existing and planned hydraulic constructions (flood control dams) and construction sites located in its floodplain.

Methods. Numerical modeling of flow characteristics (estimated flood zone, distribution of speeds and directions of flow, estimated water levels) on the site of the Kondoma river was conducted using the HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) modeling system ver. 5.0.5. The model comprised three different scenarios. Scenario 1, the floodplain is relatively unbroken and there are no flood control dams and overburden dump; Scenario 2, there is a current flood control dam and overburden dump in the floodplain; Scenario 3, there are all the current objects mentioned in Scenario 2 and a designed flood control dam in the floodplain. The studied characteristics of the Kondoma river on the site under investigation were compared within all three implemented scenarios.

Results. A simulation model for the passage of flood (1 % of the exceedance probability) according to three scenarios was developed for the site of the Kondoma river, with Scenario 1 taken as the control. The model was calibrated, and the roughness coefficients of the floodplain and channel were chosen as adequate to actual conditions. Numerical flow characteristics were obtained (the shape of the estimated flood zone, the distribution of speeds and directions of flow, and water levels and depths) according to the three mentioned scenarios and the conclusions were drawn concerning the extent of influence of the current structures in the left floodplain of the Kondoma river on the shape of free surface, and also the influence under condition of a new flood control dam appearing in the left floodplain was forecasted.

Key words:

Flood protection dams, numerical modeling, flooded zones, 2D hydraulic models, simulation models, HEC-RAS modeling system.

REFERENCES

- Di Baldassarre G., Viglione A., Carr G., Kuil L., Salinas J.L., Bloschl G. Socio-hydrology: conceptualising human-flood interactions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, vol.17, pp. 3295–3303.
- Smirnov G.N., Kurlovich E.V., Vitreshko I.A., Malgina I.A. *Gidrologiya i gidrotekhnicheskie sooruzheniya* [Hydrology and hydraulic structures]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 472 p.
- Postanovlenie Pravitelstva RF ot 18.04.2014 g.* [Resolution of the Government of the Russian Federation as of 04.18.2014]. No. 360. Moscow, 2014.
- Varentsova N.A., Nikiforov D.A., Granich P.S. Normativno-pravovye osnovy proektov opredeleniya granits zon zatopeniya i sushchestvuyushchie problemy [Regulatory bases of projects for determining the boundaries of flood zones and existing problems]. *Materialy dokladov XIV Obshcherossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i vystavki. Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskaniy v stroitelstve v Rossiyskoy Federatsii* [Materials of reports of the 14th All-Russian Scientific and Practical Conference and Exhibition. Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation]. Moscow, 2018. pp. 194–196.
- Kovenya V.M., Chirkov D.V. *Metody konechnykh raznostey i konechnykh obyomov dlya resheniya zadach matematicheskoy fiziki* [Finite difference and finite volume methods for solving problems of mathematical physics]. Novosibirsk, Novosibirsk State University Publ., 2013. 87 p.
- Le Meote B. *Vvedenie v gidrodinamiku i teoriyu voln na vode* [Introduction to hydrodynamics and the theory of waves on water]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974. 368 p.
- Bates P.D., Lane S.N., Ferguson R.I. *Computational fluid dynamics: applications in environmental hydraulics*. Chichester, John Wiley & Sons Ltd, 2005. 531 p.
- Pyankov S.V., Shikhov A.N. *Geoinformatsionnoe obespechenie modelirovaniya gidrologicheskikh protsessov i yavleniy* [Geoinformational support for modeling hydrological processes and phenomena]. Perm, Perm State Research University Publ., 2017. 148 p.
- Saleh S.M., Ducharme A., Oudin L., Flipo N., Ledoux E. Hydraulic modeling of flow, water levels and inundations: Serein River case study. *PIREN-Seine*. Paris, 2009, pp. 1–48.
- Colby J.D., Turner A.B., Csontos R.M., Batten M. Flood modeling using a synthesis of multi-platform LiDAR data. *Water*, 2013, vol. 5, pp. 1533–1560.
- Zemtsov V.A., D Vershinin.A., Inishev N.G. Imitatsionnoe modelirovanie zatorov (na primere r. Tom, Zapadnaya Sibir) [Imitation modeling of ice dams (case study of Tom River, Western Siberia)]. *Lyod i Sneg*, 2014, vol. 127, no. 3, pp. 59–68.
- Dyhouse G., Hatchett J., Benn J. *Floodplain modeling using HEC-RAS*. Waterbury, Haestad press, 2003. 744 p.
- Koshel S.M., Entin A.L. Sovremennyye metody rascheta raspredeleniya poverkhnostnogo stoka po tsifrovym modelyam relyefa [Modern methods for calculating the distribution of surface runoff from digital elevation models]. *Geomorfologiya: Sovremennyye metody i tekhnologii tsifrovogo modelirovaniya relyefa v naukach o Zemle*, 2016, Iss. 6, pp. 24–34.
- Novakovskiy B.A., Kolesnikova O.N., Prasolova A.I., Permyakov R.V. Geoinformatsionnoe modelirovanie navodneniy po materialam kosmicheskoy syemki (na primere g. Biysk, Altayskiy kray) [Geoinformational modeling of floods based on materials from space imagery (using the example of the city of Biisk, Altai Krai)]. *Geoinformatika*, 2015, Iss. 1, pp. 15–20.

15. Romanovskiy R.V. Application of computer modeling methods of flood zones at maximum design water levels for solving project tasks in the disturbed lands recultivation and design of buildings and facilities near water bodies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 186–201. In Rus.
16. Heine R.A. Levee effects upon flood levels: an empirical assessment. *Hydrological Processes*, 2012, vol. 26, pp. 3225–3240.
17. Di Baldassarre G., Castellarin A., Brath A. Analysis of the effects of levee heightening on flood propagation: example of the River Po, Italy. *Hydrological Sciences Journal*, 2009, vol. 54 (6), pp. 1007–1017.
18. Yen B.C. Hydraulics and effectiveness of levees for flood control. *Hydrometeorology, Impacts, and Management of Extreme Floods*, 1995, vol. 1, pp. 1–12.
19. Krylenko I.N., Golovlev P.P., Kornilova E.D., Sazonov A.A., Fingert E.A. Otsenka chuvstvitelnosti kharakteristik zatopeniya k izmeneniyam prirodnykh i antropogennykh faktorov na osnove dvumernoy gidrodinamicheskoy modeli [Assessment of sensitivity of flooding characteristics to changes in natural and anthropogenic factors based on a two-dimensional hydrodynamic model]. *Treti Vinogradovskie chteniya. Grani gidrologii. Sbornik dokladov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii pamyati vydayushchegosya russkogo gidrologa Yuriya Borisovicha Vinogradova* [Edges of hydrology. Proc. of the International scientific conference devoted to the outstanding Russian hydrologist Yury B. Vinogradov]. Ed. By O.M. Makareva. St-Petersburg, 2018. pp. 898–902.
20. Sazonov A.A., Krylenko I.N., Golovlev P.P. Evaluation of the efficiency of flood-control dams using the methods of mathematical modeling (on the example of the river Tom near the city of Mezhdurechensk). *Prirodoobustroystvo*, 2015, no. 4, pp. 73–76. In Rus.
21. Arcement G., Schneider V. *Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains*. U.S. Geological survey water supply paper 2339. U.S., Government printing office, 1989. 38 p.
22. Sazonov A.A., Krylenko I.N. *Analiz chuvstvitelnosti dvumernoy gidrodinamicheskoy modeli k izmeneniyu koeffitsiyenta shero-khovatosti* [Sensitivity analysis of a two-dimensional hydrodynamic model to a change in the roughness coefficient]. *Treti Vinogradovskie chteniya. Grani gidrologii. Sbornik dokladov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii pamyati vydayushchegosya russkogo gidrologa Yuriya Borisovicha Vinogradova* [Edges of hydrology. Proc. of the International scientific conference devoted to the outstanding Russian hydrologist Yury B. Vinogradov]. Ed. By O.M. Makareva. St-Petersburg, 2018, pp. 933–938.
23. Zinovyev A.T., Koshelev K.B., Marusin K.V. Ispolzovaniye kompyuternogo modelirovaniya i gis-tekhnologiy dlya nauchnogo obosnovaniya inzhenernykh resheniy po predotvrashcheniyu zatopeniya poym rek [Use of computer modeling and GIS technologies for scientific justification of engineering solutions aimed to prevent flooding of floodplain areas]. *Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Collection of materials of All-Russian scientific-practical conference]. Sochi, 8–14 October 2018. Novocherkassk, Lik Publ., 2018. Vol. 2, pp. 98–105.

Received: 5 May 2020.

Information about the authors

Roman V. Romanovskiy, chief hydrologist, LLC Sibirgidrotekhproekt.