









Анализ возможных последствий крупномасштабной добычи песчано-гравийной смеси в нижних бьефах крупных гидроузлов на основе гидродинамического моделирования (на примере Воткинской ГЭС)

А.П. Лепихин^{1,2,3}  , Ю.С. Ляхин^{2,4}, А.А. Тиунов^{1,2} , А.А. Возняк^{1,2,3} ,
А.И. Лучников^{1,4} , Д.И. Перепелица⁴ , А.В. Богомолов^{2,4} 

 lepin49@mail.ru

¹ ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», г. Екатеринбург, Россия

² Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Россия

³ Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия

⁴ ООО «Западно-Уральский институт водных и экологических проблем», г. Пермь, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Представлена оценка возможных гидравлических последствий крупномасштабной добычи песчано-гравийных смесей в верхней части Нижне-Камского водохранилища (нижнем бьефе Воткинского водохранилища) на основе проведения многовариантных вычислительных экспериментов на разработанной гидродинамической модели рассматриваемого водного объекта. Оценка необходима для выработки мероприятий по минимизации отрицательных последствий и обеспечения соблюдения баланса интересов между водопользователями. **Методы.** Работа построена на сопряжении комплекса натурных наблюдений с вычислительными экспериментами на основе гидродинамических моделей в 1D и 2D постановках, позволяющих проводить гидродинамические расчеты для волн попусков с ГЭС. **Результаты.** Исследована динамика уровней воды для различных сценариев расчета, построены графики сравнения уровней воды по результатам расчетов в одно- и двумерной моделях для морфометрии 2019 г. в естественных условиях и с учетом выработки месторождений песчано-гравийных смесей. Эксперименты показали, что разработка только восьми месторождений (Волковское, Ольховское, Сивинский, Гольяновское, Макаровское,

© Лепихин А.П., Ляхин Ю.С., Тиунов А.А., Возняк А.А., Лучников А.И., Перепелица Д.И., Богомолов А.В., 2021








Верхне-Дулесовский, Симонихинское и Симонихинское-2) приведет к необходимости увеличения для поддержания судоходных глубин 3,3 м расхода сбросов в нижний бьеф Воткинской ГЭС до 1800 м³/с при продолжительности сброса 12 ч или поддержания постоянного сброса 1500 м³/с при продолжительности не менее 24 ч. При сравнительном анализе графиков уровней воды, как при одномерном моделировании, так и двумерном, можно выделить три участка с сильной просадкой уровня (15–41 см) в связи с крупномасштабной добычей песчано-гравийной смеси.


КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: уровненный режим водохранилища, гидродинамическое моделирование, последствия крупномасштабной добычи песчано-гравийных смесей, просадка уровня.

Для цитирования: Лепихин А.П., Ляхин Ю.С., Тиунов А.А., Возняк А.А., Лучников А.И., Перепелица Д.И., Богомолов А.В. Анализ возможных последствий крупномасштабной добычи песчано-гравийной смеси в нижних бьефах крупных гидроузлов на основе гидродинамического моделирования (на примере Воткинской ГЭС) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. 3. С. 86–104. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-5.

Дата поступления 15.02.2021.

ANALYSIS OF THE POSSIBLE CONSEQUENCES OF LARGE-SCALE PRODUCTION OF SAND AND GRAVEL MIXTURE IN THE DOWNSTREAM OF LARGE HYDROELECTRIC FACILITIES BASED ON HYDRODYNAMIC MODELING (THE VOTKINSK HPP AS AN EXAMPLE)

Anatoliy V. Lepikhin^{1, 2, 3}  , Yuri S. Lyakhin^{2, 4}, Alexey A. Tiunov^{1, 2} ,
Anna A. Wozniak^{1, 2, 3} , Anton I. Luchnikov^{1, 4} , Dmitiy V. Perepelitsa⁴ ,
Andrey V. Bogomolov^{2, 4} 

 lepin49@mail.ru

¹ Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, Ekateriburg, Russia

² Perm Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

³ Perm State National Research University, Perm, Russia

⁴ West Ural Institute of Water and Environmental Problems, Perm, Russia

ABSTRACT

Significance. The authors have presented estimation of possible hydraulic consequences of the large-scale mining of sand/gravel mixtures in the upper part of the Lower Kama Reservoir (the Votkinsk Reservoir downstream) based on the multi-version computation experiments with the developed hydro/dynamic model of the water body under consideration. This estimation is necessary for development of measures aimed at minimization of negative

aftermath and provision of the interest balance between water users. **Methods.** The work is based on the conjugation of a set of field observations with computational experiments based on hydrodynamic models in 1D and 2D formulations, which make it possible to carry out hydrodynamic calculations for the waves of releases from HPPs. **Results.** The dynamics of water levels was investigated for various calculation scenarios, graphs were drawn for comparing water levels based on the results of calculations in one- and two-dimensional models for morphometry in 2019 in natural conditions and taking into account the development of deposits of sand and gravel mixtures. The experiments have demonstrated that development of only eight deposits (Volkovsk, Olkhovsk, Sivinsk, Golyanovo, Makarovsk, Upper-Dulesovsk, Simonikhinsk, and Simonikhinsk-2) will cause the necessity (in order to maintain the 3.3 m navigation depth) to increase the discharge to the Votkinsk HPP downstream up to 1800 m³/s or maintaining of continuous 1500 m³/s discharge for at least 24 hours. In the process of the water level graphs comparative analysis, both in one-dimension and two-dimension modeling, one can distinguish three sites with great level subsidence (15–41 cm) due to the large-scale mining of sand/gravel mixture.

Keywords: reservoir level regime, hydrodynamic modeling, consequences of the large-scale mining of sand/gravel mixtures, subsidence of level.

For citation: Lepikhin A.P., Lyakhin Y. S., Tiunov A.A., Wozniak A.A., Luchnikov A.I., Perepelitsa D.I., Bogomolov A.V. Analysis of the Possible Consequences of Large-Scale Production of Sand and Gravel Mixture in the Downstream of Large Hydroelectric Facilities Based on Hydrodynamic Modeling (the Votkinsk HPP as an Example). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2021. No. 4. P. 86–104. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-5.

Received February 15, 2020

ВВЕДЕНИЕ

Разработка русловых месторождений нерудных строительных материалов (далее – НСМ), как правило, активно затрагивает интересы большого количества различных водопользователей. В настоящее время эффективным инструментом, позволяющим учесть и сопоставить интересы водопользователей, провести поиск наиболее оптимальных вариантов решения проблем, является построение и проведение многовариантных вычислительных экспериментов на основе гидродинамических моделей водных объектов. Разработка гидродинамической модели верхней части Нижне-Камского водохранилища, позволяющей максимально объективно оценить возможные гидравлические последствия крупномасштабной добычи ПГС, и стала целью данной работы.

Технологии построения вычислительных гидродинамических моделей водных объектов и решение задач расчета неустановившегося движения воды в реках стали развиваться с середины 1960-х годов, с начала активного применения вычислительных средств. В первую очередь, из отечественных исследователей следует отметить работы О.Ф. Васильева [1], Л.С. Кучмента [2–3], Б.А. Историка [4], М.С. Грушевского [5] и др. Достаточно

полное современное обобщенное решение данной задачи применительно к распространению паводочной волны представлено в коллективной монографии [6]. Распространение волн подпертых нижних бьефов гидроузлов и формирование обратных волн рассматривается в работе А.П. Лепихина и др. [7]. Исследование динамики русловых процессов при добыче ПГС представлено в трудах [8–15].

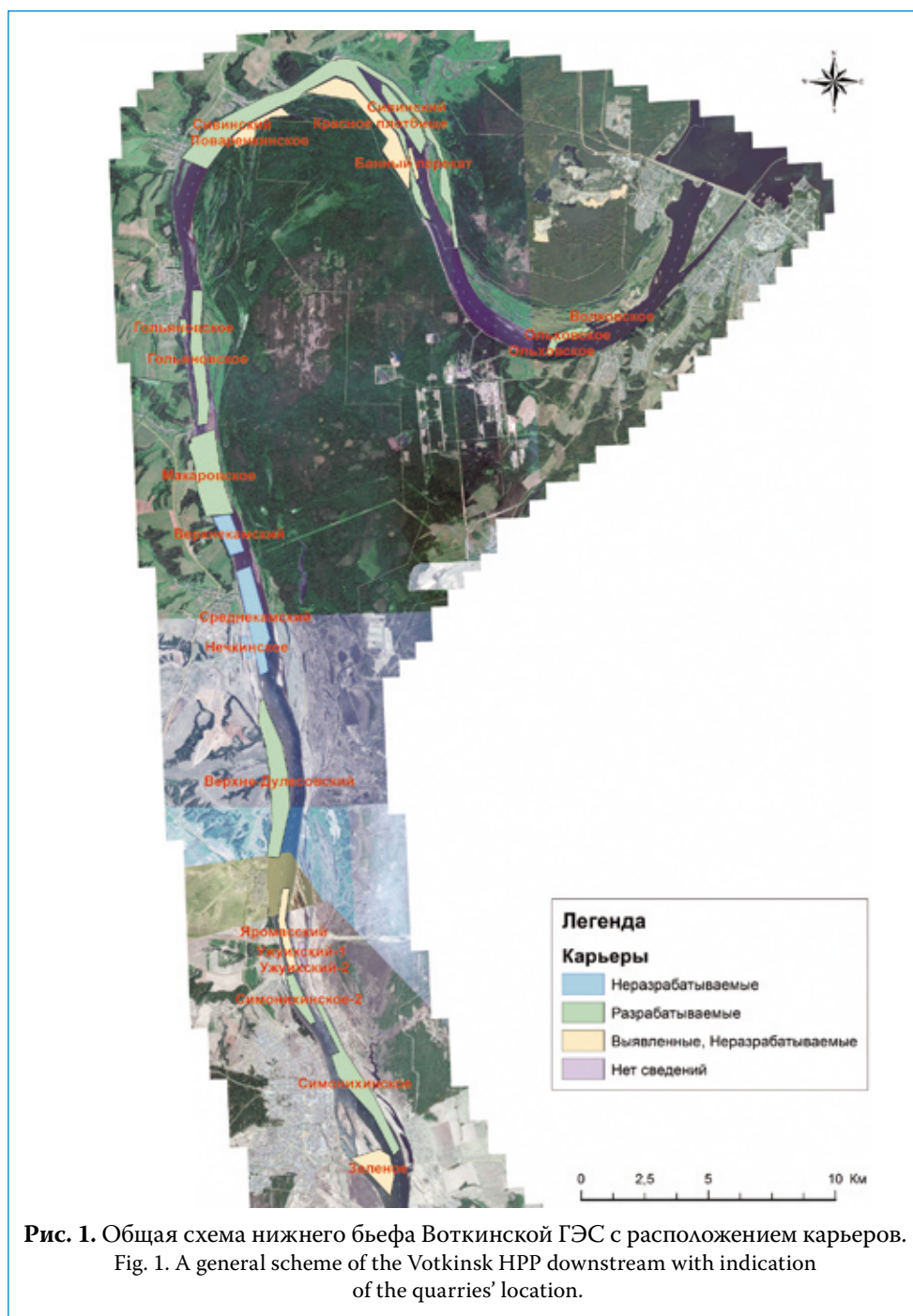
Использование комбинированной гидродинамической модели в 1D-2D постановках для расчета последствий разработки месторождений НСМ в нижнем бьефе ГЭС проводится впервые.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ

Нижний бьеф Воткинской ГЭС – убедительный пример сложной ситуации, возникающей при регламентации добычи НСМ с учетом интересов водопользователей. Всего в нижнем бьефе Воткинской ГЭС находится 14 карьеров, где производилась добыча песчано-гравийных смесей (рис. 1). Однако в настоящее время (последние 10 лет) добыча НСМ идет только на восьми карьерах, эта ситуация и будет проанализирована в статье. Сложность и актуальность решения данной задачи подчеркивается в работе С.А. Двинских и др. [16].

Построение гидродинамической модели можно разделить по этапам выполнения работ. На первом этапе необходимо провести полное обследование местности, включая водный объект, его пойму и прилегающую территорию. В процессе первого этапа выполняются подготовительные, топографо-геодезические, гидрологические и камеральные работы. Результатом является составление картосхем распределения глубин и морфометрических особенностей русла, получение цифровой модели рельефа (ЦМР), которая будет использоваться при гидродинамическом моделировании. Для участка р. Камы от Воткинской ГЭС до г. Сарапула комплекс таких работ был выполнен Камским филиалом ФГБУ РосНИИВХ в 2019 г.

На втором этапе осуществляется выбор сценариев для проведения модельных расчетов, определение подходящей расчетной модели для построения гидродинамической модели, наиболее полно описывающей данный водный объект и, собственно, построение гидродинамической модели. Для построения гидродинамической модели в одномерном приближении для всего Нижнекамского водохранилища протяженностью 282 км выбран специализированный гидрологический программный пакет HEC-RAS v.5.0.7, разработанный центром гидравлических исследований (Hydrologic Engineering Center), США [17], который позволяет проводить гидродинамические расчеты для волн попусков с ГЭС. В ходе работ был выделен в отдельную модель наиболее важный участок р. Камы ниже плотины Воткинской ГЭС до ж/д моста ниже г. Сарапула протяженностью 75 км.



В качестве сценарных расчетов для одномерной модели проведены многовариантные расчеты с изменением расхода сброса от времени (более подробно все сценарии представлены далее). Для всех расчетов на нижней границе в районе ж/д моста ниже г. Сарапула задавалась кривая $Q=f(H)$, полученная в ходе камеральных работ.

Гидродинамическое моделирование уровенного режима является эффективным инструментом для прогнозирования изменения уровня воды вследствие изменения русла реки (дноуглубление, спрямление, размыв русла со временем и т. д., в нашем случае, вследствие разработки месторождений ПГС) и позволяет заблаговременно составить рекомендации по минимизации негативных последствий от таких работ.

Программный комплекс HEC-RAS v.5.0.7 представляет собой систему всестороннего гидродинамического моделирования различных поверхностных водных объектов в одномерной постановке. В настоящее время HEC-RAS способна выполнять одномерные расчеты профиля водной поверхности для устойчивого, постепенно изменяющегося потока в естественных или построенных каналах. В рамках данной работы для этого произведено разбиение поперечного сечения для расчета общего расхода, при этом используемый в HEC-RAS подход состоит в том, чтобы разделить потоки в областях поймы, используя входные точки пересечения n -значений сечения (места, где n -значения изменяются) в качестве основы для разделения, где n – коэффициент шероховатости Маннинга для участка. Разделение основного русла на отдельные зоны производится в тех случаях, когда коэффициенты шероховатости неоднородны внутри расчетной области. Поэтому была исследована структура коэффициента Маннинга n для русла реки с учетом грядовой составляющей.

В модели в 1D-постановке для данного участка реки было назначено, измерено и оцифровано 302 сечения с шагом в 250 м. Для построения гидродинамической модели в двумерном приближении для участка р. Камы ниже плотины Воткинской ГЭС до ж/д моста ниже г. Сарапула протяженностью 75 км выбран лицензированный, специализированный гидрологический программный пакет SMS v.11.1 (Surface-water Modeling System) компании Aquaveo LLC, с использованием модели RiverFlow 2D GPU компании Hydronia LLC [18], позволяющий проводить гидродинамические расчеты для различных гидрологических условий.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе была проведена калибровка модели по данным наблюдений. В ходе калибровочных расчетов определен оптимальный коэффициент шероховатости Маннинга n , равный 0,023 (с/м^{1/3}). Следует отметить, что в ходе калибровочных расчетов для двумерной модели выявлен опти-

мальный коэффициент шероховатости Маннинга n , равный $0,025$ ($\text{с}/\text{м}^{1/3}$). Калибровка двумерной модели осуществляется именно при расходе 1200 $\text{м}^3/\text{с}$, т. к. все дальнейшие расчеты проводятся с этим среднегодовым расходом воды обеспеченностью 95 %. Калибровка показала, что двумерные модели более чувствительны к коэффициенту шероховатости Маннинга n , при увеличении или при уменьшении расходов воды коэффициенты шероховатости могут значительно меняться.

В качестве сценарных расчетов для одномерной модели проведены многовариантные расчеты с изменением расхода сброса от времени, более подробно все сценарии представлены в таблице.

Расчет основных гидродинамических характеристик уровня режима в одномерной постановке происходит по следующим сценариям. Расчетное время во всех сценарных расчетах – 5 сут.

Сценарий 1: расход воды в нижнем бьефе Воткинской ГЭС – 600 куб. м/с, постоянный на протяжении 5 сут. Данный расчет нужен для выявления нижней границы уровня воды по р. Каме для сравнения со всеми последующими расчетами.

Сценарии 2, 3, 4: расход воды в нижнем бьефе Воткинской ГЭС – 1200 , 1500 , 1800 $\text{м}^3/\text{с}$, постоянный на протяжении 5 сут. Данный расчет нужен для выявления верхней границы уровня воды по р. Каме для сравнения со всеми последующими расчетами, при которых пиковым будет расход 1200 , 1500 , 1800 $\text{м}^3/\text{с}$ соответственно.

Сценарии с буквами а, б, в, г, д: расход воды в нижнем бьефе Воткинской ГЭС в первые 12 ч составляет 600 $\text{м}^3/\text{с}$, далее происходит его увеличение в течение 15 мин до 1200 , 1500 , 1800 $\text{м}^3/\text{с}$. Такой расход держится в течение 1 ч (а), 2 ч (б), 4 ч (в), 6 ч (г), 12 ч (д), далее происходит уменьшение в течение 15 мин расхода до 600 $\text{м}^3/\text{с}$, и он уже постоянен до конца расчетного времени.

Все вышеописанные сценарии посчитаны при аналогичных для первоначального варианта гидрологических условиях, только в ЦМР на участке моделирования добавлены данные о дноуглублении, вследствие проведения полной добычи песчано-гравийной смеси на всех разведанных и разрабатываемых месторождениях ПГС (известных на момент создания ЦМР) в нижнем бьефе Воткинской ГЭС до ж/д моста в районе г. Сарапула.

Для переобозначения сценариев с добычей ПГС к названию сценариев без добычи добавили символ «К» (пример: Сценарий 2К, Сценарий 2аК). Для одномерной модели получено 38 сценариев расчета.

В результате проведенных сценарных расчетов, составлены графики уровней воды в р. Каме на участке от Воткинской ГЭС до ж/д моста в районе г. Сарапула. В связи с невозможностью представления всех полученных

Таблица. Параметры сценарных расчетов
Table. Parameters of the scenario calculations

№ сценария	Расход воды, Q (м ³ /с)				
	первые 12 ч	увеличение в течение 15 мин	const в течение (X) часов	уменьшение в течение 15 мин	до конца расчетного времени
1	600	600	600	600	600
2	1200	1200	1200	1200	1200
2а	600	От 600 до 1200	1200 (1)	от 1200 до 600	600
2б	600	От 600 до 1200	1200 (2)	от 1200 до 600	600
2в	600	От 600 до 1200	1200 (4)	от 1200 до 600	600
2г	600	От 600 до 1200	1200 (6)	от 1200 до 600	600
2д	600	От 600 до 1200	1200 (12)	от 1200 до 600	600
3	1500	1500	1500	1500	1500
3а	600	От 600 до 1500	1500 (1)	от 1500 до 600	600
3б	600	От 600 до 1500	1500 (2)	от 1500 до 600	600
3в	600	От 600 до 1500	1500 (4)	от 1500 до 600	600
3г	600	От 600 до 1500	1500 (6)	от 1500 до 600	600
3д	600	От 600 до 1500	1500 (12)	от 1500 до 600	600
4	1800	1800	1800	1800	1800
4а	600	От 600 до 1800	1800 (1)	от 1800 до 600	600
4б	600	От 600 до 1800	1800 (2)	от 1800 до 600	600
4в	600	От 600 до 1800	1800 (4)	от 1800 до 600	600
4г	600	От 600 до 1800	1800 (6)	от 1800 до 600	600
4д	600	От 600 до 1800	1800 (12)	от 1800 до 600	600

графиков на рис. 2 приведено сравнение трех самых лимитирующих вариантов расчета без карьеров и с карьерами, а на рис. 3 и рис. 4 – сравнение трех менее лимитирующих вариантов. Таким образом, на рис. 2 представлены графики уровней воды для естественной морфометрии русла, полученной при съемке в 2019 г., рассчитанные по сценариям 1, 2 и 2д, а также

графики уровней воды, рассчитанные по таким же сценариям 1, 2 и 2Д, но с учетом дноуглубления в связи с полной отработкой месторождений ПГС, т. е. по сценариям 1К, 2К и 2ДК. На рис. 3 и рис. 4 представлены графики уровней воды для естественной морфометрии русла, полученной при съемке в 2019 г., рассчитанные по сценариям 3, 3Д (рис. 3) и 4, 4Д (рис. 4), а также графики уровней воды, рассчитанные по сценариям 3, 3Д и 4, 4Д, но с учетом дноуглубления в связи с полной отработкой месторождений ПГС, т. е. по сценариям 3К, 3ДК и 4К, 4ДК.

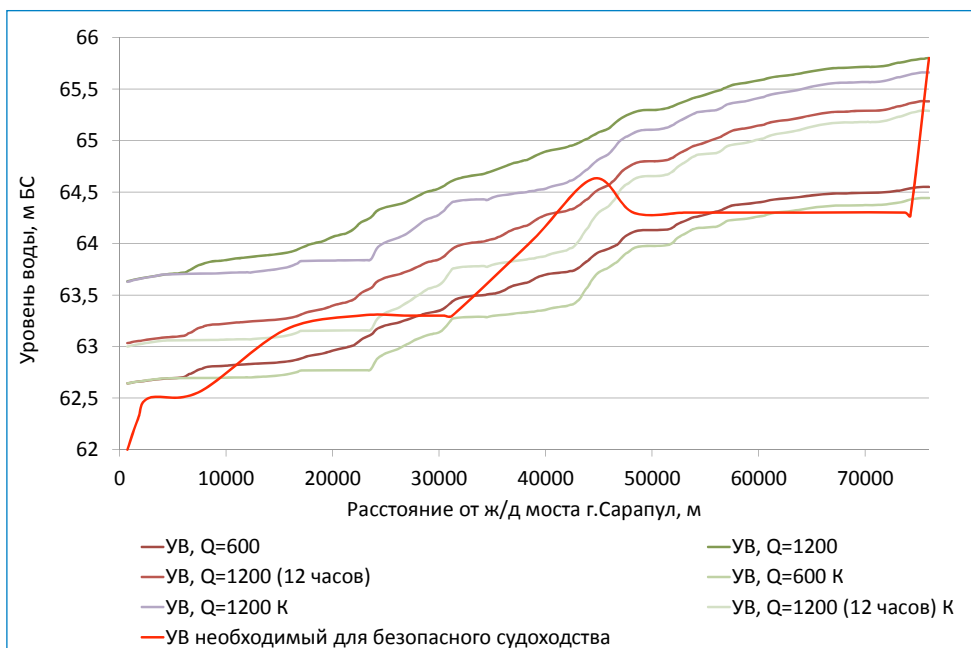


Рис. 2. График сравнения уровней воды по результатам сценарных расчетов (№ 1, № 2, № 2Д) в одномерной модели для морфометрии 2019 г.

для естественных условий и с учетом выработки месторождений ПГС.

Fig. 2. The graph of water level comparison according the results of scenario calculations (No. 1, No 2, No 2Д) in a one-dimension model for the morphometry of 2019 for the natural conditions and with taking into account the sand/gravel mixture deposits depletion.

Линия на графиках «УВ необходимый для безопасного судоходства» обозначает уровень воды, при котором обеспечивается минимальная глубина воды для прохождения судов 3,3 м.

Самым важным лимитирующим участком является судоходный шлюз Воткинской ГЭС. Отметка дна шлюза 62,50 м БС и, соответственно, с лимитирующим уровнем воды 65,8 м БС, при котором обеспечива-

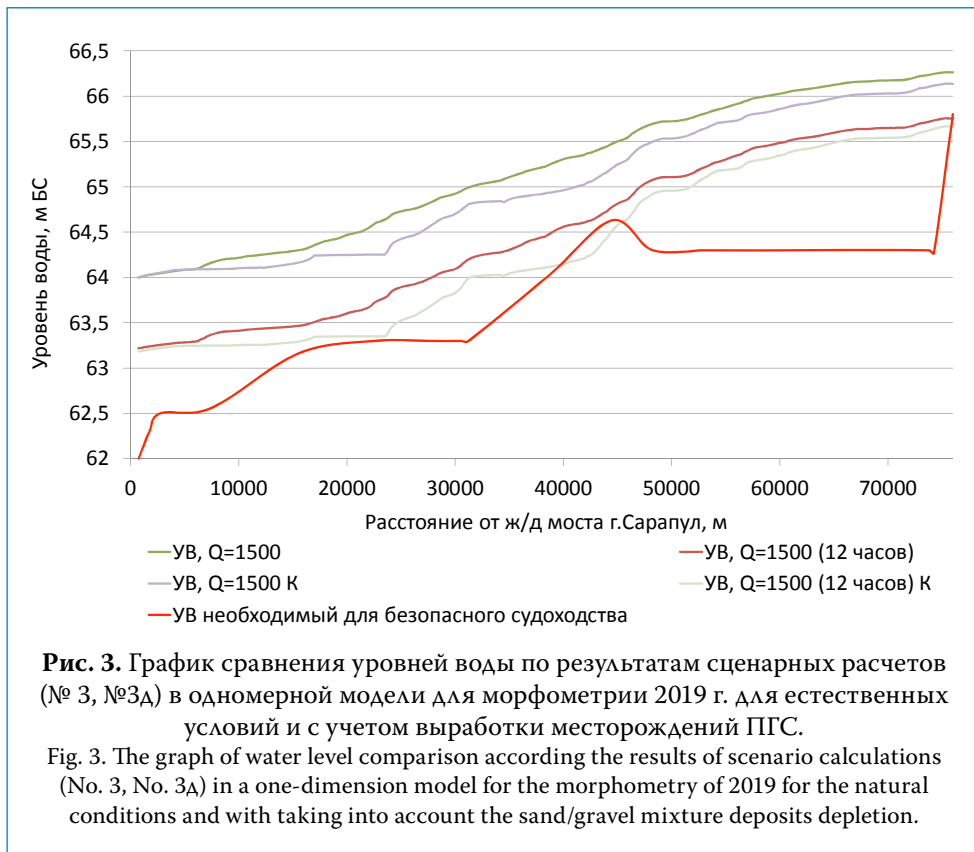
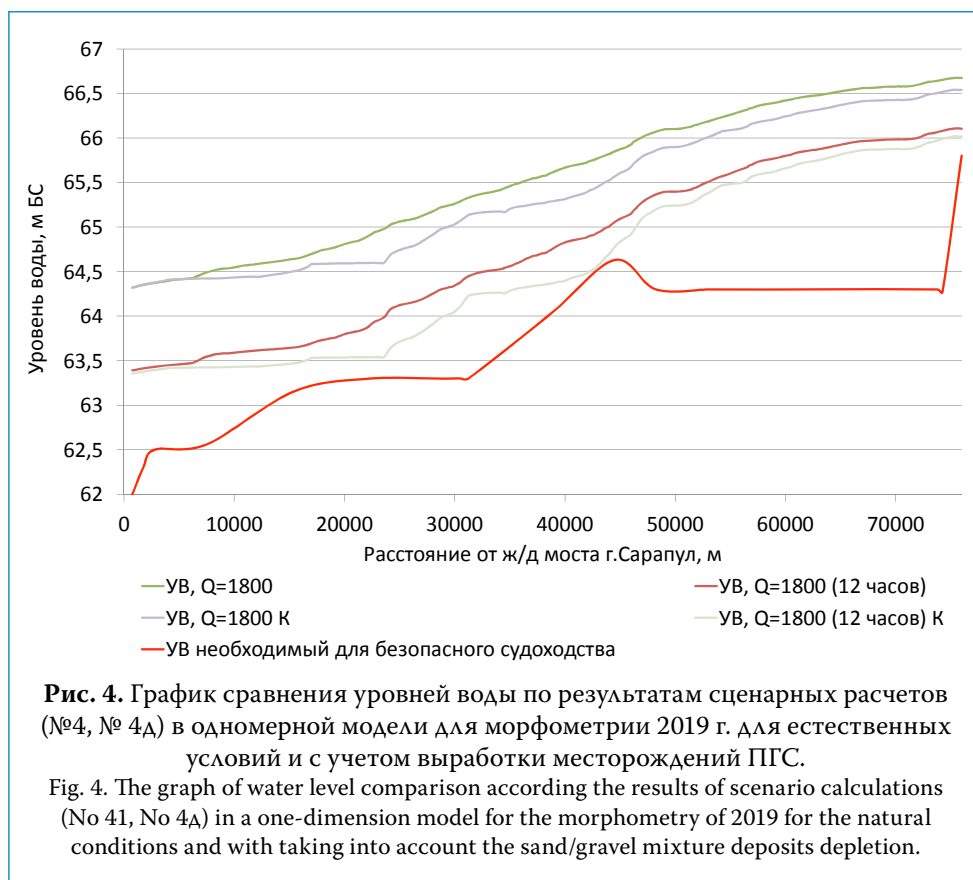


Рис. 3. График сравнения уровней воды по результатам сценарных расчетов (№ 3, №3А) в одномерной модели для морфометрии 2019 г. для естественных условий и с учетом выработки месторождений ПГС.

Fig. 3. The graph of water level comparison according the results of scenario calculations (No. 3, No. 3A) in a one-dimension model for the morphometry of 2019 for the natural conditions and with taking into account the sand/gravel mixture deposits depletion.

ется минимальная глубина воды для прохождения судов 3,3 м. Второй лимитирующий участок – Гольяновский пережат в 30 км ниже плотины (его хорошо видно на графиках) с отметкой 61,2 м БС и, соответственно, с лимитирующим уровнем воды 64,5 м БС. Из представленных графиков следует, что даже в естественных условиях только при сценариях 2, 3, 4 и 4д возможен безопасный проход судов по участку р. Камы Чайковский шлюз – г. Сарапул. При остальных сценариях, при реальной морфометрии 2019 г., не обеспечивается минимальная глубина, необходимая для прохождения судов.

По вариантам с учетом дноуглубления в ходе полной выработки месторождений ПГС только при сценариях 2К, 3К, 4К и 4дК возможен безопасный проход судов по участку р. Камы Чайковский шлюз – г. Сарапул. При остальных сценариях с учетом дноуглубления в ходе полной выработки месторождений ПГС не обеспечивается минимальная глубина, необходимая для прохождения судов.



При пропуске двумерной модели результаты аналогичны одномерным, хотя и дают более расширенную картину причин происходящих процессов, т. к. показывают возникновение вихревых структур в поле скоростей при уменьшении расходов сброса воды на плотине Воткинской ГЭС.

При сравнительном анализе графиков можно выделить три участка с сильной просадкой уровня в связи с крупномасштабной добычей ПГС. Все числовые характеристики просадки уровня воды приведены для расхода сброса воды в нижний бьеф Воткинской ГЭС $1200 \text{ м}^3/\text{с}$ как при естественном русле р. Камы (сценарий 2), так и при крупномасштабной добыче ПГС в русле р. Камы (сценарий 2К). Все остальные сценарии с другими расходами сброса имеют подобное выделение трех участков, но с несколько другими значениями просадки уровня, не существенно отличающимися.

Следует отметить, что за «0» на графиках взят 1851 км по судовому ходу р. Камы. Первый участок располагается в районе месторождений Симони-

хинское и Симонихинское-2, на графиках с 4 по 12 км (рис. 2–4). Максимальная просадка уровня воды на данном участке наблюдается на 12 км и составляет 15 см. По двумерной модели максимальная просадка уровня воды на данном участке отмечается также на 12 км и равна 20 см.

Второй участок располагается в районе месторождения Верхне-Дулесовский, на графиках с 17 по 23,5 км (рис. 2–4). Максимальная просадка уровня воды на данном участке наблюдается на 23,5 км и составляет 41 см (по двумерной модели – 35 см). При этом в начале участка, на 17 км, максимальная просадка уровня воды всего 13 см (18 см), т. е. просадка собственно от месторождения Верхне-Дулесовский составляет 28 см.

Третий участок располагается в районе месторождений Макаровское и Гольяновское, на графиках с 31 по 40 км (рис. 2–4). Максимальная просадка уровня воды на данном участке наблюдается на 40 км и составляет 36 см (по двумерной модели – 28 см). В начале участка, на 31 км, максимальная просадка уровня воды всего 21 см (19 см), таким образом, просадка от месторождений Макаровское и Гольяновское составляет 15 см (9 см). Далее, начиная с 40 км, на графиках (рис. 2–4) отражено, что уровень воды плавно приближается к первоначальному уровню при морфометрии без карьеров. При этом максимальная наблюдаемая просадка уровня воды в районе нижнего бьефа Воткинской ГЭС всего 13 см (по двумерной модели – 15 см), т. е. восстановление уровня воды на графиках от 40 км, где максимальная просадка уровня 36 см (28 см), происходит на 23 км (13 см). Эти данные свидетельствуют о том, что месторождения ПГС Волковское, Ольховское и Сивинское оказывают незначительное влияние на уровень воды в р. Каме в нижнем бьефе Воткинской ГЭС.

Следует также выделить опасный участок для судоходства, на графиках это участок с 42 по 49 км, где наблюдается наименьшая глубина реки, особенно, с 43,5 по 45 км (рис. 2–4). В то же время просадка уровня воды в связи с крупномасштабной добычей ПГС в данном районе составляет порядка 25 см (по двумерной модели – 22 см). Самым важным лимитирующим участком является шлюз. В районе шлюза при постоянном расходе 1200 м³/с без отработки карьеров обеспечивается минимальная глубина 3,3 м. При полной отработке месторождений ПГС и при тех же расходах сброса воды с Воткинской ГЭС просадка в районе шлюза 13 см, что не обеспечивает минимальную глубину для прохождения судов. Для обеспечения глубин судоходства при полной отработке месторождений ПГС необходимо увеличить постоянный сброс воды до 1500 м³/с.

Следует подчеркнуть, что при тех же расходах воды (1200 м³/с) одномерная и двумерная модели дают значительно различающиеся значения просадки уровня воды. Уровень просадки воды при двумерном расчете меньше при-

мерно на 5 см. Данное различие объясняется тем, что двумерная модель позволяет значительно более детально учитывать рельеф русла, чем одномерная. Однако расчеты в двумерной модели более ресурсоемки по времени, а с учетом калибровки, верификации и проведения не одного, а множества расчетов, время работы с двумерной моделью составляет месяцы.

Работа в одномерной модели, даже с учетом расчетов по уточнению параметров, калибровки, верификации и проведения не одного, а множества расчетов, занимает менее месяца. Поэтому, с учетом достаточно приемлемой сходимости результатов оценки уровня воды на моделях 1D- и 2D – постановках, при решении данных задач использование моделей в 1D – постановке представляется более предпочтительным.

ВЫВОДЫ

Уровненный режим в нижних бьефах крупных гидроузлов определяется комплексом трех взаимосвязанных факторов:

- пропускной способностью русла;
- величиной и временем поддержания расхода сброса;
- уровнем воды на нижней границе расчетной области.

Изменение одного из них может обуславливать значительное изменение уровненного режима при поддержании стабильными других факторов.

Для оценки возможных последствий разработки новых русловых мероприятий нерудных полезных ископаемых в рамках данной работы были созданы гидродинамические модели участка р. Камы в 1D (HEC RAS v.5.0.7) и 2D (SMS v.11.1) приближениях на основе лицензированных программных продуктов. Выполненные многовариантные вычислительные эксперименты показали, что разработка только восьми месторождений (Волковское, Ольховское, Сивинский, Гольяновское, Макаровское, Верхне-Дулесовский, Симонихинское и Симонихинское-2) приведет к необходимости увеличения для поддержания судоходных глубин 3,3 м расхода сбросов в нижний бьеф Воткинской ГЭС до 1800 м³/с при продолжительности сброса 12 ч или поддержания постоянного сброса 1500 м³/с при продолжительности не менее 24 ч.

В целом при организации добычи ПГС в нижнем бьефе Воткинской ГЭС возникает чисто оптимизационная задача, при решении которой должны рассматриваться и учитываться как минимум четыре компонента:

- экономический эффект добычи ПГС;
- наличие устойчивого судоходства;
- экономические потери гидроэнергетики, связанные с поддержанием гарантированных глубин путем увеличения расхода сброса через ГЭС;
- затраты на проведение руслорегулирующих работ, направленных на обеспечение гарантированных глубин судоходства.

В качестве рекомендации по обеспечению прохождения судов на участке р. Камы от шлюза Воткинской ГЭС до г. Сарапула предлагается поддерживать расход сброса в нижний бьеф Воткинской ГЭС постоянным не менее $1200 \text{ м}^3/\text{с}$ при продолжительности не менее 24 ч. Однако при полной добыче ПГС на разрабатываемых месторождениях необходимо будет поддерживать постоянным расход сброса воды уже не менее $1500 \text{ м}^3/\text{с}$ при продолжительности не менее 24 ч. В то же время следует отметить, что при подъеме уровня воды на Нижнекамском водохранилище до проектных отметок в 68,00 м БС воздействие от разработки русловых месторождений нерудных строительных материалов перестанет быть доминирующим фактором, определяющим уровенный режим в нижнем бьефе Воткинского водохранилища. Разработка ПГС уже не будет влиять на поддержание гарантированных глубин для обеспечения устойчивости судоходства на данном участке р. Камы.

Проведенные многочисленные сравнения расчетов в 1D и 2D-постановках показали, что более оптимальным для рассматриваемого случая изучения просадки уровня воды в условиях крупномасштабной добычи ПГС является одномерная модель, позволяющая в относительно короткие сроки провести многовариантные расчеты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев О.Ф. и др. Численный метод расчета распространения длинных волн в открытых руслах и приложение его к задаче о паводке // Доклады АН СССР, 1963. Т. 151. № 3. С. 525–527.
2. Калинин Г.П., Кучмент А.С. О численных методах решения уравнения Сен-Венана для расчета неустановившегося движения воды в реках // Метеорология и гидрология. 1963. № 6. С. 3–9.
3. Кучмент А.С. Расчеты неустановившегося движения воды в нижних бьефах ГЭС // Комплексное использование водных ресурсов к режиму Волжско-Камского каскада гидроэлектростанции: сб. М.: Энергия, 1965, 1967.
4. Историк Б.Л. Расчет неустановившегося движения воды в открытых водотоках на электронных вычислительных машинах // Труды Гидропроекта, 1964. Вып. 12. С. 222–239.
5. Грушевский М.С. Использование электронных цифровых машин для расчета неустановившегося движения воды в призматических руслах // Труды ГГИ. Вып. 94. 1962.
6. Mascarenhas F.C.B., Toda K., Miguez M.G., Inoue K. Flood Risk Simulation. WIT PRESS: Southampton and Boston, 2005. 436 p.
7. Лепихин А.П., Тиунов А.А., Возняк А.А. Особенности формирования и расчета обратных течений в Воткинском водохранилище (1D-постановка) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 5. С. 21-36.
8. СТО ФГБУ «ГГИ» 52.08.31–2012. Добыча нерудных строительных материалов в водных объектах. Учет руслового процесса и рекомендации по проектированию и эксплуатации русловых карьеров.

9. Lyubimova T.P., Lepikhin A.P., Parshakova Ya.N. Numerical simulation of the dynamics evolution of alluvial mining quarries IOP. Journal of Physics: Conf. Series 879 (2017) 012019 p.1-6. DOI:10.1088/1742-6596/879/1/012019
10. Насибуллина Р.Н. Отчет по поискам месторождений песчано-гравийной смеси в долинах рек Камы и Ижа в пределах территории УАССР и ТАССР и предварительной разведке Каракулинского месторождения в Каракулинском районе УАССР (1975–1978г.г.). Инв. № 45а.
11. Пухарев Ф.В. Подсчет запасов ПГС и вскрыши на 2 очереди Волковского карьера завода «Стройдеталь». Инв. № 8682.
12. Векслер А.Б., Петров О.А. Основные факторы антропогенного воздействия на гидравлический и русловой режимы в нижних бьефах гидроэлектростанций и на условия их эксплуатации // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2018. Т. 287. С. 38–54.
13. Векслер А.Б., Петров О.А. Расчетное определение связи расходов и уровней воды в нижних бьефах ГЭС при трансформации русла // Гидротехническое строительство. №10. 2019. С. 42-49.
14. Лепихин А.П., Перепелица Д.И., Лучников А.И., Тиунов А.А. Оценка деформаций русла реки Камы и разработка рекомендаций по регламентации добычи нерудных строительных материалов в пределах нижнего бьефа Камской ГЭС // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 6. С. 39-48. DOI: 10.35567/1999-4508-2018-6-4.
15. Лепихин А.П., Тиунов А.А. Современные гидродинамические модели русловых процессов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 4. С. 114– 143. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-4-6.
16. Двинских С.А., Клименко Д.Е., Ларченко О.В., Минкин К.А. Анализ русловых деформаций в нижнем бьефе Воткинского водохранилища // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению: сб. докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова. Санкт-Петербургский государственный университет. Санкт-Петербург, 2020. С. 600-605.
17. HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual (CPD-69) / Gary W. Brunner, Version 5.0, February 2016, p. 547.
18. Reference Manual “RiverFlow2D Two-Dimensional River Dynamics Model” August, 2016, Hydronia LLC [<http://www.hydronia.com>].

REFERENCES

1. Vasil'yev O.F. et al. Chislennyy metod rascheta rasprostraneniya dlinnykh voln v otkrytykh ruslakh i prilozheniye yego k zadache o pavodke [A numerical method for calculating the propagation of long waves in open channels and its application to the problem of flood] Doklady AN SSSR, 1963. Vol. 151. No. 3, p. 525–527 (in Russ).
2. Kalinin G.P., Kuchment L.S. O chislennykh metodakh resheniya uravneniya Sen-Venana dlya rascheta neustanovivshegosya dvizheniya vody v rekakh [On numerical methods for solving the Saint-Venant equation for calculating unsteady water movement in rivers]. *Meteorologiya i gidrologiya*. 1963. No. 6, p. 3–9 (in Russ).

3. Kuchment L.S. Raschety neustanovivshegosya dvizheniya vody v nizhnikh b'yefakh GES [Calculations of unsteady water movement in the downstream of a hydroelectric power station] Kompleksnoye ispol'zovaniye vodnykh resursov k rezhimu Volzhsko-Kamskogo kaskada gidroelektrostantsii: [Complex use of water resources to the regime of the Volga-Kama cascade of hydroelectric power plants: collection of articles]. Moscow: Energy, 1965, 1967 (in Russ).
4. Istorik B.L. Raschet neustanovivshegosya dvizheniya vody v otkrytykh vodotokakh na elektronnykh vychislitel'nykh mashinakh [Calculation of unsteady water movement in open watercourses on electronic computers]. *Trudy Gidroproyekt*, 1964. Vyp. 12. Pp. 222–239. (in Russ).
5. Grushevskiy M.S. Ispol'zovaniye elektronnykh tsifrovyykh mashin dlya rascheta neustanovivshegosya dvizheniya vody v prizmaticheskikh ruslakh [The use of electronic digital machines for calculating unsteady water movement in prismatic channels]. *Trudy GGI*. Vyp. 94. 1962 (in Russ).
6. Mascarenhas F.C.B., Toda K., Miguez M.G., Inoue K. Flood Risk Simulation. WIT PRESS: Southampton and Boston, 2005. 436 p.
7. Lepikhin A.P., Tiunov A.A., Voznyak A.A. Osobennosti formirovaniya i rascheta obratnykh techeniy v Votkinskom vodokhranilishche (1D-postanovka) [Features of the formation and calculation of reverse flows in the Votkinsk reservoir (1D setting)]. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2018. No. 5, p. 21–36. (in Russ).
8. STO FGBU «GGI» 52.08.31–2012. Dobycha nerudnykh stroitel'nykh materialov v vodnykh ob'yektakh. Uchet ruslovogo protsessa i rekomendatsii po proyektirovaniyu i ekspluatatsii ruslovykh kar'yerov. [Extraction of nonmetallic building materials in water bodies. Accounting for the channel process and recommendations for the design and operation of channel openings.] (in Russ).
9. Lyubimova T.P., Lepikhin A.P., Parshakova Y.N. Numerical simulation of the dynamics evolution of alluvial mining quarries IOP. *Journal of Physics: Conf. Series* 879. (2017) 012019. Pp. 1–6. DOI:10.1088/1742-6596/879/1/012019
10. Nasibullina R.N. Otchet po poiskam mestorozhdeniy peschano-graviynoy smesi v dolinakh rek Kamy i Izha v predelakh territorii UASSR i TASSR i predvaritel'noy razvedke Karakulinskogo mestorozhdeniya v Karakulinskom rayone UASSR (1975-1978g.g.). [Report on the search for deposits of sand and gravel mixture in the valleys of the Kama and Izha rivers within the territory of the Ukrainian SSR and TASSR and preliminary exploration of the Karakulinsky deposit in the Karakulinsky region of the Ukrainian SSR (1975-1978).] Inv. No. 45a.] (in Russ).
11. Pukharev F. V. Podschet zapasov PGS i vskryshi na 2 ocheredi Volkovskogo kar'yera zavoda "Stroydetal"[Calculation of reserves of ASG and overburden at the 2nd stage of the Volkovsky open-pit of the "Stroydetal" plant]. Inv. No. 8682.] (in Russ).
12. Veksler A.B., Petrov O.A. Osnovnyye faktory antropogennogo vozdeystviya na gidravlicheskiy i ruslovoy rezhimy v nizhnikh b'yefakh gidroelektrostantsiy i na usloviya ikh ekspluatatsii [The main factors of anthropogenic impact on the hydraulic and channel regimes in the downstream of hydroelectric power plants and on the conditions of their operation]. *Izvestiya VNIIG im. B. Ye. Vedeneyeva*. 2018. Vol. 287, p. 38–54 (in Russ).
13. Veksler A.B., Petrov O.A. Raschetnoye opredeleniye svyazi raskhodov i urovney vody v nizhnikh b'yefakh GES pri transformatsii rusla [Calculated determination of the relation-

- ship between flow rates and water levels in the downstream of a hydroelectric power station during channel transformation]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*. No. 10. 2019. Pp. 42-49.] (in Russ).
14. Lepikhin A.P., Perepelitsa D.I., Luchnikov A.I., Tiunov A.A. Otsenka deformatsiy rusla reki Kamy i razrabotka rekomendatsiy po reglamentatsii dobychi nerudnykh stroitel'nykh materialov v predelakh nizhnego b'yefa Kamskoy GES [Assessment of deformations of the Kama River bed and development of recommendations for the regulation of the extraction of nonmetallic building materials within the downstream of the Kama hydro power plant] *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2018, No. 6, p. 39-48.] (in Russ).
 15. Lepikhin A.P., Tiunov A.A. Sovremennyye gidrodinamicheskiye modeli ruslovykh protsessov [Modern hydrodynamic models of channel processes]. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2019. No. 4, p. 114-143.] (in Russ).
 16. Dvinskikh S.A., Klimenko D.Ye., Larchenko O.V., Minkin K.A. Analiz ruslovykh deformatsiy v nizhnem b'yefe Votkinskogo vodokhranilishcha, [Analysis of channel deformations in the downstream of the Votkinsk Reservoir]. *Fourth Vinogradovskie readings. Hydrology from knowledge to worldview: collection of articles*. Saint Petersburg State University. St. Petersburg, 2020. p. 600-605.] (in Russ).
 17. HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual (CPD-69) / Gary W. Brunner, Version 5.0, February 2016, p. 547.
 18. Reference Manual "RiverFlow2D Two-Dimensional River Dynamics Model" August, 2016, Hydronia LLC [<http://www.hydronia.com>].

Сведения об авторах:

Лепихин Анатолий Павлович, д-р геогр. наук, профессор, директор, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; заведующий лабораторией проблем гидрологии суши, «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; профессор, кафедра гидрологии и охраны водных ресурсов, ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; ORCID: 0000-0001-9874-3424; e-mail: lepihin49@mail.ru

Ляхин Юрий Сергеевич, канд. техн. наук, директор, ООО «Западно-Уральский институт водных и экологических проблем», Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; научный сотрудник, лаборатория проблем гидрологии суши, «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; e-mail: ljahin85@mail.ru

Тиунов Алексей Александрович, ведущий инженер-программист, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; ведущий инженер, лаборатория проблем гидрологии суши,

«Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; ORCID: 0000-0003-2015-8828; e-mail: alexey.tiunov@gmail.com

Возняк Анна Анатольевна, канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; старший научный сотрудник, лаборатория проблем гидрологии суши, «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; доцент, кафедра гидрологии и охраны водных ресурсов, ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; ORCID: 0000-0002-6155-1573; e-mail: aavoznyak@gmail.com

Лучников Антон Игоревич, вед. инженер-исследователь, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; инженер – гидролог 1 категории отдела изысканий, ООО «Западно-Уральский институт водных и экологических проблем», Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; ORCID:0000-0002-0660-2462; e-mail: luchnikovanton@gmail.com

Перепелица Дмитрий Ильич, начальник проектного отдела, главный инженер проектов, ООО «Западно-Уральский институт водных и экологических проблем», Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; ORCID:0000-0003-2499-7899; e-mail: perepelitsa_di@mail.ru

Богомолов Андрей Владимирович, канд. техн. наук, начальник отдела изысканий, ведущий инженер-гидролог, ООО «Западно-Уральский институт водных и экологических проблем», Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; научный сотрудник, лаборатория проблем гидрологии суши, «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; ORCID: 0000-0003-0626-4069; e-mail: whitewing85@mail.ru

About the authors:

Anatoly P. Lepikhin, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Director, Russian Research Institute for the Integrated Water Management and Protection Kama Branch, ul. Nikolai Ostrovsky, 113, Perm, 614002, Russia; Head of the Laboratory of Land Hydrology Problems, “Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences” – branch of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (“Ural Branch of the Russian Academy of Sciences”), ul. Siberskaya, 78A, Perm, 614007, Russia; Professor, Department of Hydrology and Water Resources Protection, Perm State National Research University, ul. Bukireva, 15, Perm, 614990 Russia; ORCID: 0000-0001-9874-3424; e-mail: lepin49@mail.ru

Yuri S. Lyakhin, Candidate of Technical Sciences, Director, “West Ural Institute of Water and Environmental Problems”, ul. Nikolai Ostrovsky, 113, Perm, 614002, Russia; Researcher, Laboratory of Land Hydrology Problems, “Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences” – branch of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (“Ural Branch of the Russian Academy of Sciences”), ul. Siberskaya, 78A, Perm, 614007, Russia; ljahin85@mail.ru

Alexey A. Tiunov, Leading Software Engineer, Russian Research Institute for the Integrated Water Management and Protection Kama branch, ul. Nikolai Ostrovsky, 113, Perm, 614002, Russia; Leading Engineer, Laboratory of Land Hydrology Problems, “Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences” – branch of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (“Ural Branch of the Russian Academy of Sciences”), ul. Siberskaya, 78A, Perm, 614007, Russia; ORCID: 0000-0003-2015-8828; e-mail: alexey.tiunov@gmail.com

Anna A. Wozniak, Candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher, Russian Research Institute for the Integrated Water Management and Protection Kama Branch, ul. Nikolai Ostrovsky, 113, Perm, 614002, Russia; Senior Researcher, Laboratory of Land Hydrology Problems, “Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences” – branch of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (“Ural Branch of the Russian Academy of Sciences”), ul. Siberskaya, 78A, Perm, 614007, Russia; Associate Professor, Department of Hydrology and Water Resources Protection, Perm State National Research University, ul. Bukireva, 15, Perm, 614990 Russia; ORCID: 0000-0002-6155-1573; e-mail: aavoznyak@gmail.com

Anton I. Luchnikov, Leading Research Engineer, Russian Research Institute for the Integrated Water Management and Protection Kama Branch, ul. Nikolai Ostrovsky, 113, Perm, 614002, Russia; engineer-hydrologist of the 1st category of the survey department, “West Ural Institute of Water and Environmental Problems”, ul. Nikolai Ostrovsky, 113, Perm, 614002, Russia; ORCID: 0000-0002-0660-2462; luchnikovanton@gmail.com

Dmitry I. Perepelitsa, Head of the Project Department, Chief Projects Engineer, “West Ural Institute of Water and Environmental Problems”, Russia, 614002, Perm, ul. Nikolai Ostrovsky, 113; ORCID: 0000-0003-2499-7899; perepelitsa_di@mail.ru

Andrey V. Bogomolov, Candidate of Technical Sciences, Head of the Survey Department, Leading Engineer-hydrologist, “West Ural Institute of Water and Environmental Problems”, ul. Nikolai Ostrovsky, 113, Perm, 614002, Russia; Research Officer, Laboratory of Land Hydrology Problems “Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences” – branch of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (“Ural Branch of the Russian Academy of Sciences”), ul. Siberskaya, 78A, Perm, 614007, Russia; ORCID: 0000-0003-0626-4069; whitewing85@mail.ru