

## Разработка гидродинамической модели р. Вага для решения задач защиты населенных пунктов от затопления

С.А. Мирошниченко<sup>1</sup>  , А.И. Лучников<sup>1,2</sup> , С.А. Лепешкин<sup>1</sup> ,  
А.А. Тиунов<sup>2</sup> 

 kama2100@mail.ru

<sup>1</sup> ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, г. Пермь, Россия

<sup>2</sup> Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Населенные пункты, расположенные в пойме р. Вага (в среднем и нижнем течении) при прохождении весеннего половодья подвергаются периодическому затоплению. В результате затопления наносится значительный материальный ущерб жилой застройке и объектам экономики, подвергаются серьезному риску жизни людей. **Методы.** Для решения задач защиты населенных пунктов от затопления разработана с использованием программной среды HEC-RAS гидродинамическая модель р. Вага (на участке реки от села Верховажье до ее устья). Сформирована единая база данных картографической и гидрологической информации, выполнено компьютерное моделирование. **Результаты.** Разработанная гидродинамическая модель р. Вага позволила рассчитать наивысшие уровни воды для 1 % обеспеченности в населенных пунктах, не охваченных гидрологическими наблюдениями на стационарных постах Росгидромета. Полученные результаты расчета будут использованы в дальнейшем для разработки научно обоснованных рекомендаций по защите населенных пунктов от затопления.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** р. Вага, затопление населенных пунктов, гидродинамическая модель, компьютерное моделирование.

**Для цитирования:** Мирошниченко С.А., Лучников А.И., Лепешкин С.А., Тиунов А.А. Разработка гидродинамической модели р. Вага для решения задач защиты населенных пунктов от затопления // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 4. С. 73–86. DOI:10.35567/19994508-2024-4-73-86.

Дата поступления 21.06.2024.

### DEVELOPMENT OF A HYDRODYNAMIC MODEL OF THE VAGA RIVER TO SOLVE THE PROBLEMS OF PROTECTING SETTLEMENTS FROM FLOODING

Sergei A. Miroshnichenko<sup>1</sup>  , Anton I. Luchnikov<sup>1,2</sup> , Sergei A. Lepeshkin<sup>1</sup> ,  
Alexey A. Tiunov<sup>2</sup> 

 kama2100@mail.ru

<sup>1</sup> Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Kama Branch, Perm, Russia

<sup>2</sup> Perm Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

© Мирошниченко С.А., Лучников А.И., Лепешкин С.А., Тиунов А.А. 2024

**ABSTRACT**

**Relevance.** Settlements located in the floodplain of the Vaga River (in the middle and lower reaches) are periodically flooded during the passage of the spring flood. As a result, of flooding, serious material damage is caused to residential buildings and economic facilities, and people's lives are at serious risk. **Methods.** To solve the problems of protecting settlements from flooding, we have developed a hydrodynamic model of the Vaga River (on the section of the river from the village of Verkhovazhye to its mouth) using the HEC-RAS software environment. A unified database of cartographic and hydrological information has been formed, and computer modeling has been performed. **Results.** The developed hydrodynamic model of the Vaga River made it possible to calculate the highest water levels for 1% availability in settlements not covered by hydrological observations at stationary posts of Roshydromet. The obtained calculation results will be further used to develop scientifically based recommendations for the protection of human settlements

**Keywords:** Vaga River, flooding of settlements, hydrodynamic model.

**For citation:** Miroshnichenko S.A., Luchnikov A.I., Lepeshkin S.A., Tiunov A.A. Development of a hydrodynamic model of the Vaga River to solve the problems of protecting settlements from flooding. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 4. P. 73–86. DOI:10.35567/19994508-2024-4-73-86.

Received 21.06.2024.

**ВВЕДЕНИЕ**

В соответствии с Водным кодексом Российской Федерации<sup>1</sup> затопление, вместе с подтоплением и разрушением берегов, входит в перечень негативного воздействия вод. Под затоплением на основе определений, данных в СП 116.13330.2012, понимается образование свободной поверхности воды на участке территории в результате повышения уровня водного объекта. В соответствии со статьей 67.1 Водного кодекса Российской Федерации<sup>1</sup> в границах зон затопления запрещается строительство объектов капитального строительства, не обеспеченных сооружениями и (или) методами инженерной защиты территорий и объектов от негативного воздействия вод. Установление зон затопления и подтопления является специальным защитным мероприятием и осуществляется для предотвращения негативного воздействия вод и ликвидации его последствий. Порядок установления, изменения и прекращения существования зон затопления, подтопления определен Постановлением Правительства Российской Федерации от 18 апреля 2014 г. № 360 «О зонах затопления, подтопления»<sup>2</sup>.

Временные затопления населенных пунктов, расположенных в пойменной части рек на незарегулированных участках, наиболее часто происходят в результате подъема уровня вод в период прохождения весеннего половодья. Особенно актуальна эта проблема для северных территорий нашей страны, в т. ч. и для населенных пунктов, расположенных в пойме р. Вага, которые за последние 10 лет не раз подвергались сильному затоплению.

Для предотвращения негативного воздействия вод на участке р. Вага от с. Верховажье до ее устья по заданию Двинско-Печерского БУ Камский фили-

<sup>1</sup> Водный кодекс Российской Федерации. № 74-ФЗ (ред. от 25.12.2023) (с изм. и доп., вступ. в силу с 30.12.2023). Режим доступа: garant.ru (дата обращения: 02.02.2024).

<sup>2</sup> Постановление Правительства РФ от 18.04.2014 № 360 (ред. от 17.08.2022) «О зонах затопления, подтопления» (вместе с «Положением о зонах затопления, подтопления»).

ал ФГБУ РосНИИВХ выполняет научно-исследовательскую работу, связанную с разработкой научно обоснованных рекомендаций, включая противопаводковую защиту населенных пунктов и объектов экономики.

### ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Административно р. Вага протекает по территории двух субъектов Российской Федерации – Вологодской и Архангельской областей. Река Вага является одним из крупных притоков первого порядка Северной Двины, впадает в нее с левого берега на расстоянии 315 км от устья. Общая длина реки составляет 575 км (протяженность на исследуемом участке в нижнем и среднем течении – 410 км), площадь всего бассейна 44 800 км<sup>2</sup> (площадь бассейна исследуемого участка – 42 750 км<sup>2</sup>). Пойма реки на всем протяжении преимущественно двусторонняя. Пойменные берега невысокие, покрыты лугами и кустарником.

Гидрологический режим водотока типичен для равнинных рек центральной части Европейской территории России, для которых характерно смешанное питание с преобладанием снегового. Режим отличается высоким весенним половодьем, низкой летне-осенней меженью, прерываемой дождевыми паводками, и устойчивой продолжительной зимней меженью. Основной фазой водного режима водотоков является весеннее половодье, на которое приходится в среднем 60–70 % годового стока. Весеннее половодье проходит преимущественно одной волной с небольшими пиками на спаде, вызванными дождевыми паводками. В условиях дружного снеготаяния половодье характеризуется большой интенсивностью подъема и спада воды. Подъем уровней воды начинается в середине апреля, происходит быстро и интенсивно, его продолжительность составляет в среднем одну треть общей продолжительности половодья [1]. Пик половодья проходит чаще в первой декаде апреля (половодье, как правило, однопиковое). Наивысшие уровни весеннего половодья являются наивысшими в году. Спад половодья происходит менее интенсивно, чем подъем, быстрое падение уровня наблюдается в первые дни после пика, затем интенсивность спада уменьшается. Весеннее половодье продолжается до 1–1,5 месяцев.

Для р. Вага значительное повышение уровня воды в период прохождения весеннего половодья, прежде всего, связано с большим количеством снегозапасов, накопленных в холодный период и дружностью снеготаяния, а также наличием заторных явлений, характерных для многоводных северных рек, текущих с юга на север. Заторы льда формируют самые опасные и повторяющиеся наводнения. Они усиливают подъем уровня в русле, что способствует выходу речных вод на пойму и затоплению расположенных на ней объектов. Интенсивный ледоход, навалы льда на берегах, давление ледяных масс на сооружения приводят к значительному материальному ущербу, причиняемому населенным пунктам.

На рассматриваемой территории в пределах исследуемого участка р. Вага действуют гидрологические посты ФГБУ «Северное УГМС». Основные характеристики гидрологических постов представлены в табл. 1, их местоположение – на рис. 1.

**Таблица 1.** Основные характеристики гидрологических постов на р. Вага  
 Table 1. Main characteristics of hydrological posts on the Vaga River

Код поста	Местоположение поста	Период действия		Расстояние от устья, км	«0» поста, м БС
		открыт	закрыт		
70274	р. Вага – с. Верховажье	1994 г.	действ.	408	79,49
70275	р. Вага – д. Филяевская	1937 г.	действ.	349	59,72
70598	р. Вага – пос. Пасьва	1981 г.	действ.	242	41,72
70281	р. Вага – г. Шенкурск	1914 г.	действ.	158	30,46
70284	р. Вага – с. Усть-Сюма	1956 г.	действ.	57	18,53

Расположение населенных пунктов по длине р. Вага, подвергающихся периодическому затоплению представлено на рис. 1. Данный перечень составлен на основе запросов в муниципальные образования и МЧС Вологодской и Архангельской областей, а также по данным ФГБУ «Северное УГМС».

Перечень включает 47 населенных пунктов (рис. 1), 3 из которых расположены на территории Вологодской обл. и 44 – в Архангельской обл. Наиболее крупными населенными пунктами на исследуемом участке являются по данным за май 2024 г.: г. Вельск (21 613 чел.), с. Верховажье (6130 чел.), с. Благовещенское (993 чел.), с. Ровдино (968 чел.). В остальных населенных пунктах численность населения – до 500 чел. Общая численность населения в обследуемых населенных пунктах – порядка 32,8 тыс. чел.

В ходе выполнения научно-исследовательской работы на первом этапе был проведен комплекс инженерно-геодезических и инженерно-гидрологических изысканий. Как и для выполнения работ на р. Печоре [2, 3], активно использовалось современное геодезическое оборудование и беспилотные летательные аппараты (БПЛА). В дальнейшем при камеральной обработке материалов изысканий на р. Вага были получены необходимые для расчета зон затопления подробные ортофотопланы территории жилой застройки и цифровые модели рельефа (ЦМР).

На следующем этапе выполнен анализ условий формирования наивысших уровней воды, включающий расчеты обеспеченных значений уровней и расходов воды с приведением рядов наблюдений к единому многолетнему периоду 1938–2022 гг. в соответствии с положениями<sup>3</sup>. Проведен анализ ледового режима периода вскрытия за годы с отмеченными заторными явлениями с целью выявления заторообразующих факторов и общего вклада заторов в формирование экстремально высоких уровней воды. Как показал проведенный анализ формирования экстремальных уровней р. Вага, заторные подъемы уровней воды на реке невелики относительно уровней воды весеннего половодья и, как правило, формируются на ветви подъема весеннего половодья.

<sup>3</sup> СП 529.1325800.2023. Свод правил. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. (утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 11.09.2023, № 654/пр).



**Рис. 1.** Картограмма расположения населенных пунктов и гидрологических постов ФГБУ «Северное УГМС» на р. Вага.

**Fig. 1.** Schematic map of the location of settlements and hydrological posts of the Federal State Budgetary Institution «Severnoye UGMS» on the Vaga River.

Разреженная сеть гидрологических постов Росгидромета в бассейне р. Вага (рис. 1) и, как следствие, малый охват территории гидрометрическими наблюдениями сказываются на качестве гидрологических прогнозов, оценке локальных факторов формирования высших уровней воды. Использование гидродинамического моделирования для решения задач построения зон затопления представлено в работах [4–9].

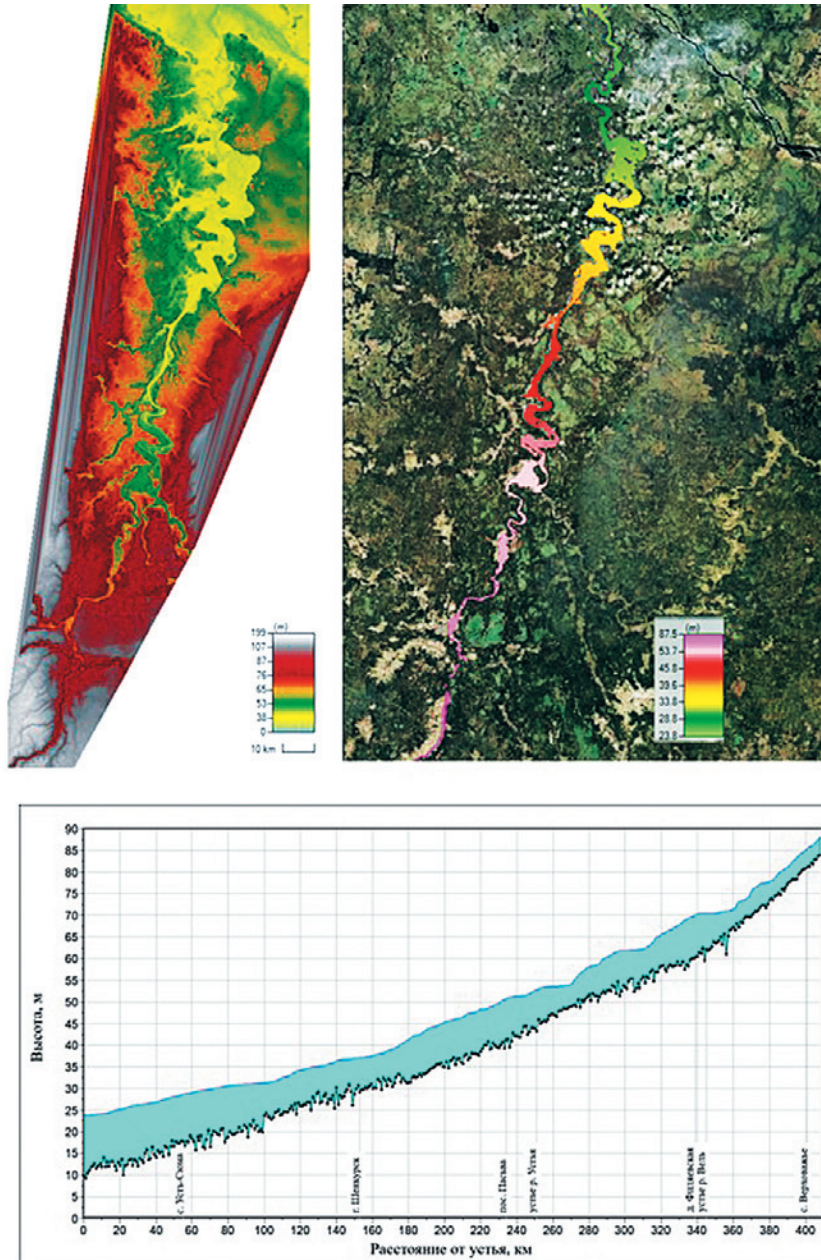
Для улучшения качества прогностических материалов возникает необходимость в комплексном подходе, объединяющем как материалы фактических наблюдений и изысканий, так и применение такого научно-исследовательского метода, как гидродинамическое моделирование. Данный подход был использован для выполнения подобной работы в 2022 г. для р. Печоры. Научно-исследовательская работа по р. Печоре принята на Научно-техническом совете Двинско-Печорского БУ, на нее получено положительное экспертное заключение РАН за №2472023/2230616000-10.

На основе полученных во время выполнения работ по р. Печоре наработок была разработана численная гидродинамическая модель исследуемого участка р. Вага протяженностью 410 км в одномерной постановке с использованием программного комплекса HEC-RAS ver. 6.3.1<sup>4</sup>. Данный программный комплекс широко применяется в нашей стране и за рубежом, опыт его использования Камским филиалом ФГБУ РосНИИВХ представлен в работах [10–13]. Программный продукт HEC-RAS предназначен для описания гидродинамических процессов русловых потоков и основан на решении системы уравнений Сен-Венана в одномерной постановке. При этом, исходя из особенностей постановок, могут решаться как нестационарные, так и стационарные задачи. Вид на цифровую модель рельефа района работ на р. Вага в программном комплексе HEC-RAS представлен на рис. 2.

Для гидродинамической модели р. Вага в одномерной постановке построено 409 поперечных сечения по всей длине водотока с шагом примерно в 1 км (рис. 2). Для корректного задания морфометрии реки на участке от впадения в Северную Двину на территории Архангельской обл. до д. Большое Ефимово Вологодской обл. для рассматриваемого водного объекта построена цифровая модель рельефа дна водотока. В целях производства корректных расчетов кривой свободной поверхности была выполнена калибровка модели по расходам и уровням воды разных обеспеченностей по трем гидрологическим постам на р. Вага (с. Верховажье, д. Филяевская, с. Усть-Сюма). По двум гидрологическим постам (пос. Пасьва, г. Шенкурск) при калибровке модели использованы расчетные обеспеченные значения уровней воды.

Калибровка гидродинамической модели выполнена с приемлемой точностью на основе проверки рассчитанных и фактических отметок уровней воды, фиксируемых на стационарных постах сети ФГБУ «Северное УГМС». В табл. 2 приведены результаты сопоставления значений расчетных уровней воды различных обеспеченностей, полученных по итогам гидродинамического моделирования на оттарированной модели р. Вага и по результатам статистической обработки рядов гидрометрических наблюдений на гидрологических постах ФГБУ «Северное УГМС».

<sup>4</sup> HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual (CPD-69) / Gary W. Brunner, Version 6.2, Exported - December 2022. 464 p.



**Рис. 2.** Вид на цифровую модель рельефа р. Вага на участке реки от с. Верховажье до устья в программном комплексе HEC-RAS и результаты расчета кривой свободной поверхности при прохождении весеннего паводка 1 % обеспеченности.

Fig. 2. View of the digital relief model of the Vaga River on the section of the river from the village of Verkhovazhye to its mouth in the HEC-RAS software package and the results of calculating the curve of the free surface during the passage of the spring flood of 1% security.

**Таблица 2.** Сопоставление расчетных данных, результатов моделирования и фактических значений уровня воды при верификации на р. Вага при разной обеспеченности

Table 2. Comparison of the calculated values obtained from the simulation results and the actual values of the water level during verification on the Vaga River with different probability

Расчетный и фактический уровень воды, м БС						
Расчетный створ	Уровень воды	Обеспеченность (P), %				
		1	2	3	5	10
Гидропост р. Вага – пос. Пасьва	расчетный	50,78	50,48	50,25	49,98	49,58
	фактический	50,78	50,51	50,26	50,01	49,61
Гидропост р. Вага – г. Шенкурск	расчетный	37,10	36,92	36,75	36,54	36,25
	фактический	37,10	36,94	36,79	36,60	36,36

Из данных табл. 2 следует, что максимальное отклонение между расчетным и фактическим уровнем составляет не более 0,11 м, среднее – 0,03 м. Результаты проведенной калибровки модели (табл. 2) показали соответствие измеренных и рассчитанных по модели кривых свободной поверхности, учитывая некоторую осредненность двухсрочных измерений уровней воды, и свидетельствуют о том, что подобранные значения параметров сопротивления могут считаться приемлемыми, что позволяет использовать их в дальнейших гидрологических расчетах.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Вопросы защиты от негативного воздействия поверхностных вод весьма актуальны, но особую значимость они приобретают для отдаленных районов севера нашей страны. Сложившееся исторически в ходе освоения данных территорий расположение населенных пунктов на берегах водных объектов приводит к тому, что они часто оказываются в зоне затопления. Не являются исключением и населенные пункты в пойме р. Вага, для которых характерны периодические затопления, сравнимые со стихийным бедствием. Наводнения способны не только нанести значительный ущерб объектам экономики, но и представляют реальную угрозу безопасности проживающих на данной территории людей. Для установления границ зон затопления для 47 населенных пунктов, расположенных на участке р. Вага от с. Верховажье до ее устья, была разработана и верифицирована гидродинамическая модель.

Гидродинамическое моделирование все более широко входит в практику исследования водных объектов. Оно позволяет решать достаточно обширный круг задач: оценка зон затопления в половодье, оценка изменения скоростного и уровенного режимов, оценка зон распространения загрязнения и т. д. В данном случае обязательная необходимость использования гидродинамической модели, в первую очередь, определялась значительной протяженностью участка исследования, а также разреженностью сети стационарных гидрологических постов наблюдений ФГБУ «Северное УГМС» на р. Вага.



Гидродинамическая модель разработана на основе компиляции результатов дешифрирования рельефа местности по актуальным снимкам высокого разрешения дистанционного зондирования Земли, атласа единой глубоководной системы европейской части России для р. Вага, находящихся в открытом доступе топографических карт, а также данных на основе дешифрирования результатов аэрофотосъемки с БПЛА, выполненной в ходе собственных полевых изысканий. Применение БПЛА значительно упростило получение высокоточной цифровой модели рельефа (ЦМР) и ортофотопланов рассматриваемых населенных пунктов. Для точных планово-высотных характеристик итоговых моделей рельефа местности и ортофотопланов для каждого населенного пункта выполнялся комплекс работ по созданию планово-высотного обоснования, включающий следующие этапы:

- закладку репера с определением его планово-высотных координат;
- настройку и запуск GNSS-приемников (База – Ровер) в режиме RTK;
- определение планово-высотных координат опорных маркеров.

Полученные ЦМР и ортофотопланы послужили основой для отображения границ зон затопления населенных пунктов.

Для построения гидродинамической модели в одномерном приближении выбран специализированный гидрологический программный комплекс HEC-RAS, как наиболее полно отвечающий требованиям решения поставленной задачи. На основе проведенной калибровки модели (табл. 2) показано соответствие измеренных и рассчитанных по модели кривых свободной поверхности, что позволяет использовать разработанную модель в гидрологических расчетах. С помощью гидродинамической модели для р. Вага рассчитаны наивысшие уровни воды 1 % обеспеченности в населенных пунктах, не охваченных гидрологическими наблюдениями.

Картирование границ зон затопления и создание тематических картосхем выполняли в программной среде ESRI ArcMap с применением инструментов 3D-Analyst. Пример построения подобной картосхемы с нанесением зоны затопления, разработанной с использованием ГИС-технологий, представлен на рис. 3.

Стандартные средства редактирования ArcGIS позволяют наносить на картосхемы любой набор графических материалов, характеризующих объект исследования. С использованием стандартных средств ГИС на картосхемах по населенным пунктам, расположенным в затапливаемой пойме р. Вага, были разработаны дополнительные тематические слои (земельные участки, дома, хозяйственные постройки и др.).

Наложение и оцифровка результатов расчета итоговых зон затопления на ортофотопланы местности в границах населенных пунктов позволили получить подробные перечни объектов жилого фонда, хозяйственной деятельности, экономики и ЖКХ. В дальнейшем данная информация будет использована для расчета причиняемого ущерба. Так, по результатам проведенных расчетов, общая площадь 47 населенных пунктов, расположенных на участке исследования, составила 43,3 км<sup>2</sup>, из них в расчетную зону затопления попадает территория 8,6 км<sup>2</sup> (это примерно 20 % от всей площади рассматриваемой



**Рис. 3.** Пример построения границы зоны затопления при прохождении весеннего половодья 1 % обеспеченности для населенного пункта д. Филевская (Вельский муниципальный район Архангельской обл.).

**Fig. 3.** An example of constructing the boundary of the flooding zone during the passage of the spring flood of 1 % probability for the village of Filyaevskaya (Velsky municipal rayon of Arkhangelsk Oblast).

мых населенных пунктов). Наибольшая площадь затопления находится в с. Верховажье – 2,4 км<sup>2</sup> (примерно 23 % от площади села). Территории населенных пунктов СОТ «Эколог», деревни: Мелеховская, Чурковская, Павшинская, Озябловская, Губино, Кулига, Болкачевская, Митинская, Тушевская, Сметанино полностью попадают в расчетную зону затопления при прохождении весеннего половодья 1 % обеспеченности.

Общее количество объектов ЖКХ (частные и многоквартирные дома) в расчетных зонах затопления составляет 1137 с общей площадью 0,15 км<sup>2</sup>.

### ВЫВОДЫ

Гидродинамическая модель р. Вага на участке от с. Верховажье до ее устья создана в рамках разработки научно обоснованных рекомендаций по противопаводковой защите населенных пунктов и объектов экономики по заданию Двинско-Печорского БВУ. Результаты гидродинамического моделирования будут использованы при расчетах возможного ущерба от негативного воздействия вод и подготовки эффективных противопаводковых рекомендаций.

Использование в работе гидродинамического моделирования для решения задач, связанных с установлением границ зон затопления, расположенных в отдаленных районах севера нашей страны населенных пунктов, является наиболее оптимальным. Оно позволяет учитывать большую протяженность рек и достаточно разреженную сеть стационарных гидрологических постов наблюдений Росгидромета. Применение БПЛА для установления границ зон затопления населенных пунктов позволяет оперативно собрать не только актуальные сведения о жилой застройке и объектах экономики, расположенных в зоне затопления, но и получить детальную цифровую модель рельефа, являющуюся основой для гидродинамического моделирования. Обработка современными программными средствами результатов аэрофотосъемки выводит на новый качественный уровень сбор исходных данных для проведения гидродинамического моделирования, значительно снижает трудозатраты на проведение обширных геодезических изысканий.

Результаты исследования продемонстрировали, что наиболее эффективным для установления границ зон затопления населенных пунктов является применение комплексного подхода, объединяющего как статистическую обработку материалов режимных наблюдений на гидрологических постах Росгидромета, проведение собственных инженерно-гидрологических и геодезических изысканий, так и использование численного гидродинамического моделирования. Рассматриваемый подход был использован и для выполнения аналогичного исследования для р. Печоры. Результаты работы по данной НИР были одобрены и официально приняты на заседании Научно-технического совета Двинско-Печорского БВУ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 3. Северный край. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 662 с.
2. Лучников А.И., Голдобин Н.А., Лепешкин С.А. Опыт комплексных натурных исследований с применением БПЛА при решении задач по оценке зон затопления территорий

- населенных пунктов (на примере реки Печоры) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 2. С. 55–68. DOI: 10.35567/19994508\_2023\_2\_4. DOI: 10.35567/19994508\_2023\_2\_4.
3. Перепелица Д.И., Тиунов А.А., Лепихин А.П., Андреев С.Р., Голдобин Н.А., Лепешкин С.А. Выбор противопаводковых мероприятий с использованием вычислительных экспериментов (на примере нижнего течения реки Печоры). // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 2. С. 69–89. DOI: 10.35567/19994508\_2023\_2\_5. DOI: 10.35567/19994508\_2023\_2\_5.
  4. Сиразетдинова Д.А., Клеин А.Н., Абдуллин А.Х. Моделирование затопления территорий с использованием Aregis PRO // Информационные технологии. Проблемы и решения. 2017. № 1 (4). С. 195 – 199.
  5. Чечин А.В., Анисимова Э.С. Моделирование зон затопления с использованием геоинформационных систем для оценки ущерба объектам недвижимости // Великие реки 2015: Труды конгресса 17-го междунаучно-промышленного форума. Нижний Новгород, 2015. С. 467 – 468.
  6. Голубева А.Б. Зоны затопления для равнинных рек Алтайского края, расчет ущербов и анализ рисков // Известия АО РГО. 2015. № 4 (39). С. 43 – 48.
  7. Hartnett M., Nash S. High-resolution flood modeling of urban areas using MSN\_Flood // Water Science and Engineering. 2017. № 10 (3). P. 175 – 183.
  8. Yongzhi L., Wenting Z., Xinmin C. Flood emergency management using hydrodynamic modeling // Procedia Engineering. 2012. Vol. 28. P. 750–753. DOI:10.1016/j.proeng.2012.01.802.
  9. Nikonorov A., Badenko V., Terleev V., Togo I., Volkova Yu., Skvortsova O., Nikonova O., Pavlov S., Mirshel W. Use of GIS-environment under the Analysis of the Managerial Solutions for Flood Events Protection Measures // Procedia Engineering. 2016. Vol. 165. P. 1731–1740. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.916.
  10. 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. DOI: 10.35567/1999-4508-2018-5-2.
  11. 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. № 4. С. 86–104. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-5.
  12. Мирошниченко С.А., Лучников А.И., Лепешкин С.А., Перепелица Д.И., Тиунов А.А. Разработка комплекса мероприятий по защите населенных пунктов от затопления в нижнем течении реки Печоры // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 2. С. 51–66. DOI: 10.35567/19994508-2024-2-51-66
  13. Лепихин А.П., Любимова Т.П., Ляхин Ю.С., Тиунов А.А., Богомолов А.В., Перепелица Д.И., Паршакова Я.Н. Гидродинамическое моделирование реки Вятки в среднем течении: постановка задачи, результаты расчетов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 3. С. 16–32. DOI: 10.35567/1999-4508-2013-3-2.

## REFERENCES

1. Surface water resources of the USSR. Vol. 3. The Northern Territory. Hydrometeoizdat. L. 1972. 662 p.
2. Luchnikov A.I., Goldobin N.A., Lepeshkin S.A. The experience of complex field studies using UAVs in solving problems of assessing flood zones of populated areas (on the example of the Pechora River). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 2. P. 55–68. DOI: 10.35567/19994508\_2023\_2\_4. DOI: 10.35567/19994508\_2023\_2\_4.
3. Perepelitsa D.I., Tiunov A.A., Lepikhin A.P., Andreev S.R., Goldobin N.A., Lepeshkin S.A. The choice of flood control measures using computational experiments (on the example of the lower reaches of the river Pechora). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 2. P. 69–89. DOI: 10.35567/19994508\_2023\_2\_5. DOI: 10.35567/19994508\_2023\_2\_5.

4. Sirazetdinova D.D., Klein A.N., Abdullin A.H. Modeling of flooding of territories using Aregis PRO. *Informatsionniye tekhnologii. Information technologies. Problems and solutions.* 2017. № 1 (4). P. 195–199.
5. Chechin A.V., Anisimova E.S. Modeling of flood zones using geo/information systems to assess damage to real estate. *Great Rivers 2015: Proceedings of the Congress of the 17th International Scientific and Industrial Forum.* In 3 vol. Nizhny Novgorod, 2015. P. 467–468.
6. Golubeva A.B. Flooding zones for flat rivers of the Altai Territory, damage calculation and risk analysis. *Izvestiya AO RGO [AO RGO newsletters].* 2015. № 4 (39). P. 43–48.
7. Hartnett M., Nash S. High-resolution flood modeling of urban areas using MSN\_Flood. *Water Science and Engineering.* 2017. № 10 (3). P. 175 – 183.
8. Yongzhi L., Wenting Z., Xinmin C. Flood emergency management using hydrodynamic modelling // *Procedia Engineering.* 2012, Vol. 28. P. 750 -753. DOI:10.1016/j.proeng.2012.01.802.
9. A. Nikonorov, V. Badenko, V. Terleev, I. Togo, Yu. Volkova, O. Skvortsova, O. Nikonova, S. Pavlov, W. Mirshel. Use of GIS-environment under the Analysis of the Managerial Solutions for Flood Events Protection Measures. *Procedia Engineering.* 2016. Vol. 165. P. 1731–1740. DOI:org/10.1016/j.proeng.2016.11.916.
10. Lepikhin A.P., Tiunov A.A., Wozniak A.A., Features of the formation and calculation of reverse currents in the Votkinsk reservoir (1D-statement). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2018. No. 5. P. 21–36. DOI: 10.35567/1999-4508-2018-5-2.
11. Lepikhin A.P., Lyakhin Yu.S., Tiunov A.A., Wozniak A.A., Luchnikov A.I., Perepelitsa D.I., Bogomolov A.V. Analysis of possible consequences of large-scale extraction of sand-gravel mixture in the lower reaches of large hydroelectric power plants based on hydrodynamic modeling (on the example of Votkinskaya HPP). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2021. No. 4. P. 86–104. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-5.
12. Miroshnichenko S.A., Luchnikov A.I., Lepeshkin S.A., Perepelitsa D.I., Tiunov A.A. Development of a set of measures to protect settlements from flooding in the lower reaches of the Pechora River. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2024. No. 2. P. 51–66. DOI: 10.35567/19994508-2024-2-51-66.
13. Lepikhin A.P., Lyubimova T.P., Lyakhin Yu.S., Tiunov A.A., Bogomolov A.V., Perepelitsa D.I., Parshakova Ya.N. Hydrodynamic modeling of the Vyatka River in the middle reaches: problem statement, calculation results. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2013. No. 3. P. 16–32.

#### Сведения об авторах:

**Мирошниченко Сергей Анатольевич**, канд. геогр. наук, руководитель филиала, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; ORCID: 0009-0007-5335-9761; e-mail: kama2100@mail.ru

**Лучников Антон Игоревич**, ведущий инженер-исследователь, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; ведущий инженер, ФГБУН «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; ORCID: 0000-0002-0660-2462; e-mail: luchnikovanton@gmail.com

**Лепешкин Сергей Александрович**, научный сотрудник, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, ORCID: 0000-0002-2308-4396; e-mail: lepehkin\_sa@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 инсти-

тут 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; email: alexey.tiunov@gmail.com

**About the authors:**

**Sergei A. Miroshnichenko**, Candidate of Geographical Sciences, Head, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Kama Branch, ul. Nikolaya Ostrovskogo, 113, Perm, 614002, Russia; ORCID: 0009-0007-5335-9761; e-mail: kama2100@mail.ru

**Anton I. Luchnikov**, Leading Engineering Researcher, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Kama Branch, ul. Nikolaya Ostrovskogo, 113, Perm, 614002, Russia; Leading Engineer, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Sibirskaaya, 78A, Perm, 614007 Russia; ORCID: 0000-0002-0660-2462; e-mail: luchnikovanton@gmail.com

**Sergey A. Lepeshkin**, Researcher, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Kama Branch, ul. Nikolaya Ostrovskogo, 113, Perm, 614002, Russia; ORCID: 0000-0002-2308-4396; e-mail: lepehkin\_sa@mail.ru

**Aleksey A. Tiunov**, Lead Software Engineer, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Kama Branch, ul. Nikolay Ostrovsky, 113, Perm, 614002, Russia; Senior Engineer, Laboratory of Land Hydrology Problems, “Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences” - branch of the Federal State Budgetary Institution of Science 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. Sibirskaaya, 78A, Perm, 614007, Russia; ORCID: 0000-0003-2015-8828; email: alexey.tiunov@gmail.com