

В.Л. Баденко<sup>1</sup>, В.И. Масликов<sup>2</sup>, М.П. Федоров<sup>3</sup>, А.Н. Чусов<sup>4</sup>

## ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТОДИКИ ВЫБОРА СТВОРОВ ПРОТИВОПАВОДКОВЫХ ГИДРОУЗЛОВ

**Резюме.** В работе анализируются методы снижения риска от наводнений путем управления расходами речного бассейна распределенной системой саморегулируемых противопаводковых гидроузлов. Разработан геоинформационный метод для обоснования выбора параметров таких гидроузлов, в первую очередь – местоположения створов, обеспечивающих минимизацию влияния на окружающую среду (экологический фактор). Результаты апробации представлены на примере Амурской области.

**Ключевые слова:** ливневые паводки, моделирование в среде ГИС, геоинформационное обеспечение, пространственный анализ.

**Введение.** Серьезной проблемой, сдерживающей освоение территорий речных пойм, является защита от наводнений. Задача становится еще более актуальной в условиях наблюдающейся тенденции глобального изменения климата, а, следовательно, и водности рек, так в России суммарный годовой сток рек в 1981–2012 гг. увеличился по сравнению с периодом 1936–1980 гг. примерно на 200 км<sup>3</sup>/год. Наблюдаемое изменение климата привело в различных регионах мира к резкому увеличению частоты крупных наводнений, сопровождающихся возрастанием экономического ущерба и числа пострадавших. Особенно тяжелые последствия вызывают ливневые наводнения. Главная опасность заключается в их внезапности и резком увеличении объема речного стока, многократно превышающего объем весеннего половодья [1, 2].

Проблема ливневых паводковых наводнений постоянно существует в районах с муссонным климатом, характерным для Дальнего Востока России, а вследствие климатических изменений предполагается ее дальнейшее обострение. Наводнение 2013 года в результате продолжавшихся около двух месяцев интенсивных дождей, которые затопили территории Дальнего Востока и Северо-Восточного Китая. В перспективе к середине XXI в. экстремальность осадков в летний период в горных районах Кавказа, в Сибири и на Дальнем Востоке может увеличиться, а следовательно возрастут частота и величина дождевых паводков. В связи с этими обстоятельствами, Правительственной комиссией по обеспечению устойчивого функционирования водохозяйственного комплекса Сибири и Дальнего Востока разработано поручение в сфере разработки мер по снижению негативного воздействия вод в регионах Сибири и Дальнего Востока, направленных на предотвращение угрозы нарушения функционирования объектов водохозяйственной инфраструктуры и реализацией целевой федеральной программы на проведение НИР и проектных работ по предотвращению и минимизации последствий прохождения паводков и противопаводковой защите.

---

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, инженерно-строительный институт, кафедра Водохозяйственное и гидротехническое строительство, Санкт-Петербург, 195251, Россия, профессор, докт. тех. н.; e-mail: vbadenko@gmail.com.

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, инженерно-строительный институт, кафедра Гражданское строительство и прикладная экология, Санкт-Петербург, 195251, Россия, профессор, докт. тех. н.; e-mail: vmaslov@list.ru.

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, инженерно-строительный институт, кафедра Гражданское строительство и прикладная экология, Санкт-Петербург, 195251, Россия, профессор, докт. тех. н., академик РАН; e-mail: m.fedorov@spbstu.ru.

<sup>4</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, инженерно-строительный институт, кафедра Гражданское строительство и прикладная экология, Санкт-Петербург, 195251, Россия, заведующий, канд. тех. н.; e-mail: chusov17@mail.ru.

В России, как и в других странах мира, распространенным и эффективным способом борьбы с наводнениями является регулирование максимального стока крупными водохранилищами. Размещаемые на основной реке они защищают земли, расположенные ниже по течению. При этом необходимую противопаводковую емкость можно разместить на боковых притоках, доля которых может составить около 50% от общей площади затопления земель в речном бассейне. Такой подход соответствует современной стратегии снижения риска от наводнений путем управления паводковыми расходами всего речного бассейна распределенной системой саморегулируемых противопаводковых гидроузлов (СПГ) при минимальном воздействии на природную среду. Ранее выполненные исследования показали целесообразность создания водохранилищ на боковых притоках в виде временно заполняемых саморегулируемых емкостей [3, 4]. Водопрпускное сооружение СПГ выполняется с нерегулируемым водосбросом без использования затворов, что повышает надежность работы и удешевляет обслуживание. В период аккумуляирования паводковых расходов ложе такого водохранилища затапливается кратковременно, что приводит к сглаживанию локального гидрографа. После прохождения паводка водохранилище СПГ самоопорожняется и остается незатопленным в естественном состоянии. В случае, если СПГ распределены по водотокам некоторого бассейна, то в контрольном створе бассейна, гидрограф будет иметь более пологий вид без пиков, характерных для катастрофических паводков и риски для населения будут понижаться.

Выбор параметров СПГ, включая их местоположения на боковых притоках, является многокритериальной задачей, и окончательное решение определяется технологическими, экономическими, экологическими и социальными факторами. Кроме того такая задача очевидно требует учета пространственной привязки указанных факторов. Поэтому при обосновании решения требуется использование данных дистанционного зондирования (ДЗЗ) и геоинформационных систем (ГИС) как интегрирующей среды. В работе рассмотрены некоторые проблемы разработки геоинформационного обеспечения методики выбора створов противопаводковых гидроузлов для российской части бассейна реки Амур. Целью настоящей работы является разработка геоинформационного метода для обоснования выбора параметров СПГ, в первую очередь высоты плотины, размеров водопрпускного отверстия и местоположения СПГ на водотоке, обеспечивающих минимизацию влияния на окружающую среду (экологический фактор).

**Материал и методы исследований.** Обоснование выбора створа СПГ проводится на основе сравнения гидрологической ситуации на водотоке при прохождении катастрофического паводка в естественных условиях и при наличии СПГ путем моделирования в среде ГИС. Общая схема геоинформационного обеспечения предлагаемой методики, составленной на основе работы [5] представлена на рис. 1. Ниже представлены некоторые комментарии к этой схеме.

Для построения цифровой модели рельефа (ЦМР) для региона Дальнего Востока целесообразно использовать следующие источники данных: 1) SRTM (Shuttle radar topographic mission) – данные находятся в свободной доступе в сети Интернет; 2) ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model) – данные находятся в свободной доступе в сети Интернет; 3) ЦМР на основе слоя «рельеф» электронных карт масштаба 1:100 000 ФГУП «Центральный картографо-геодезический центр» – покрытие всей территории России, может быть получено бесплатно для нужд госконтрактов.

Модель гидрографической сети строится на основе ЦМР (это обеспечивает согласованность ЦМР и гидрографической сети) – формируются так называемые «синтетические» реки. Благодаря согласованности ЦМР и гидрографической сети, становится возможным использование автоматизированных средств для вычисления характеристик рек (в т.ч. получение данных по рекам в разрезе субъектов РФ, водохозяйственных участков: уклоны, водосборные площади, падения, продольный профиль, водопользователи и т.д.).

Основой метода является интеграция моделей и ГИС. При этом исходные данные для моделей формируются в среде ГИС и модели используют БД ГИС для обмена информацией [6-9]. Так, например, расчет паводкового объема  $V_{акбн}(t)$ , который аккумулируется во временном водохранилище СПГ в момент времени  $t$ , производится балансовым методом:

$$V_{акбн}(t) = V_{акбн}(t-1) + [Q_{прбн}(t) - (Q_{зарегбн}(t) + Q_{испбн}(t) + Q_{филбн}(t))] \cdot \Delta t,$$

где:  $V_{акбн}(t)$  – объем воды в водохранилище в момент времени  $t$ ,  $m^3$ ;  
 $Q_{прбн}(t)$  – расход воды, поступающей в водохранилище,  $m^3/c$ ;  
 $Q_{зарегбн}(t)$  – расход воды в нижнем бьефе,  $m^3/c$ ;  
 $Q_{испбн}(t)$  – потери воды на испарение с поверхности водохранилища,  $m^3/c$ ;  
 $Q_{филбн}(t)$  – фильтрационный расход воды,  $m^3/c$ ;  
 $\Delta t$  – шаг по времени, с. При этом используется ЦМР из базы данных ГИС.

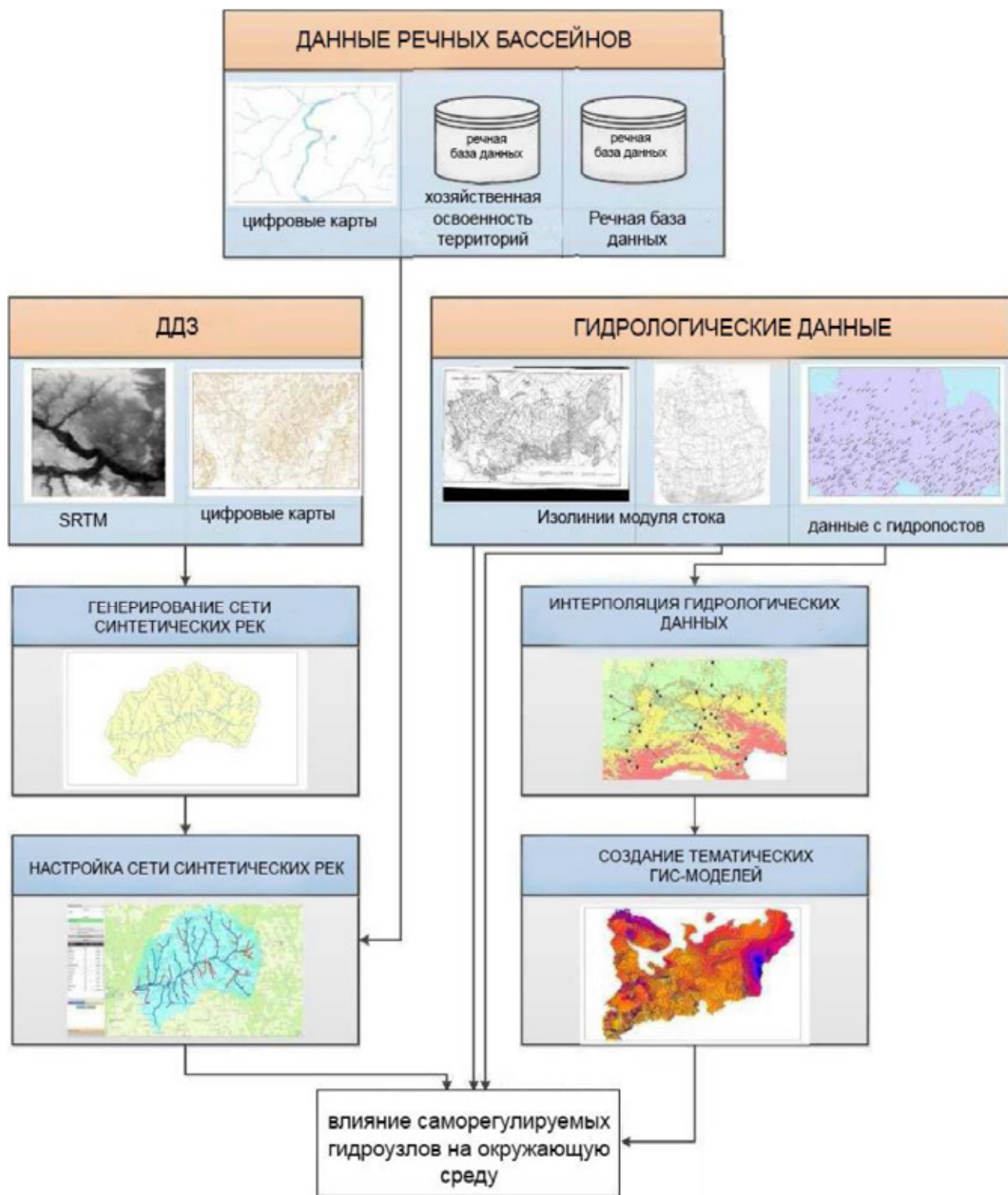


Рис. 1. Общая схема геоинформационного обеспечения предлагаемой методики

Для СПГ на боковых притоках выполнение основных природоохранных требований (экологический фактор) включает: сохранение паводко-пойменных процессов – зарегулированные сбросные расходы СПГ должны соответствовать паводку 10% обеспеченности (параметр – поперечное сечение водопропускных отверстий) и сохранение экосистем при их затоплении – максимальный уровень воды в водохранилище не должен превышать допустимый (параметр – высота плотины СПГ).

Также требуется провести сбор гидрологических данных и составить характеристики распределения максимального стока для выбранного водосборного бассейна и получить базу данных ГИС максимальных срочных расходов  $Q_{1\%}$  на любом участке реки. При этом максимальные расходы определяются согласно СП-33-101-2003. Собственно гидрологическое моделирование для определения проводилось в среде ArcGIS с использованием программ собственной разработки на языке Python и комплекса программ HEC (Hydrologic Engineering Center) – разработчик USACE, Американский Корпус Военных Инженеров.

В качестве источника объективных сведений об ограничениях по формированию водохранилищ СПГ предлагается использовать схемы территориального планирования, которые разработаны для всех субъектов Российской Федерации. Также важно обеспечение соблюдения подписанных Россией различных конвенций, связанных с защитой окружающей среды, в частности, для рассматриваемого региона Дальнего Востока, важным является сохранение болот в поймах рек.

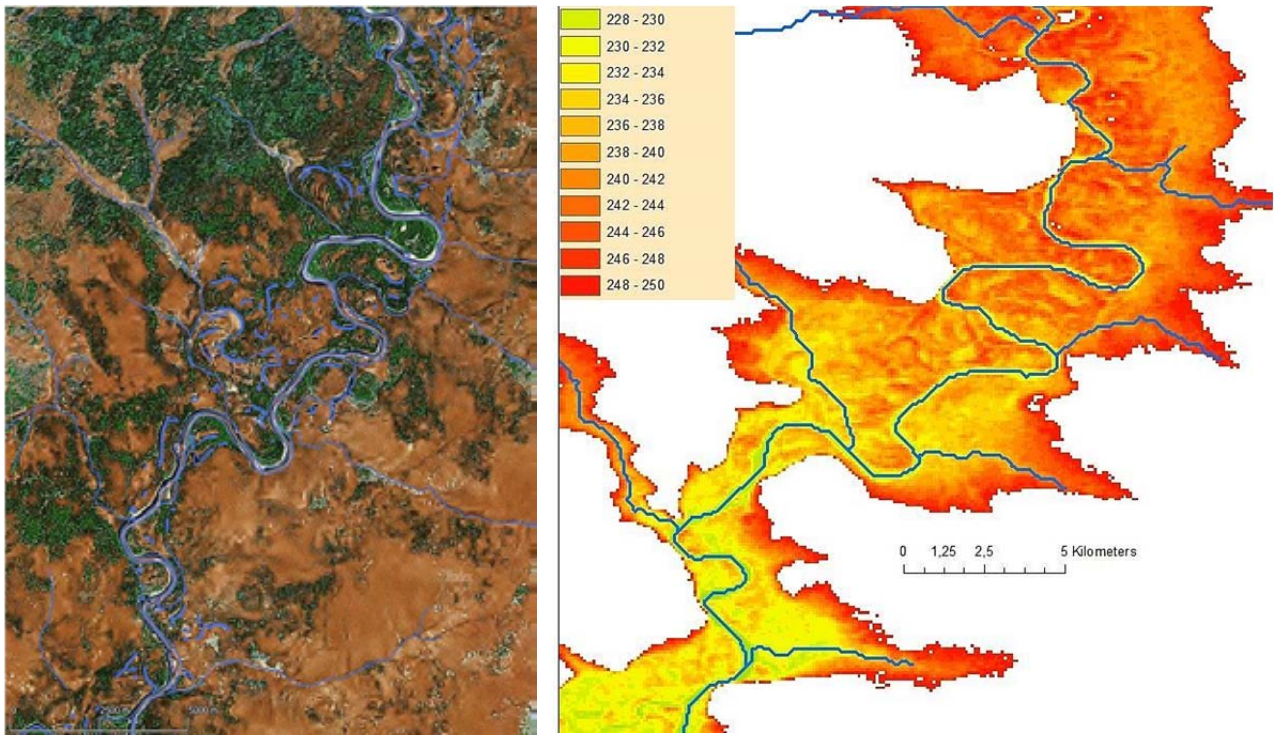
В общем случае при выборе створа и параметров СПГ необходимо проанализировать пробные точки на боковых притоках, которые могут выбираться либо автоматически с определенным шагом, либо интерактивно, на основании мнения специалиста.

**Результаты исследований и их обсуждение.** В качестве примера рассмотрен режим работы СПГ на одном из притоков бассейна реки Селемджи в Дальневосточном регионе, где отмечается одна из самых частых в России повторяемость катастрофических наводнений. Для этого региона (Амурская область) производилась оценка сохранности биоразнообразия экосистем на временно затапливаемых территориях с использованием критериев неуменьшения разнообразия, а также соотношения естественных и антропогенных экосистем. Такие оценки являлись ограничениями для учета экологического фактора при обосновании параметров СПГ.

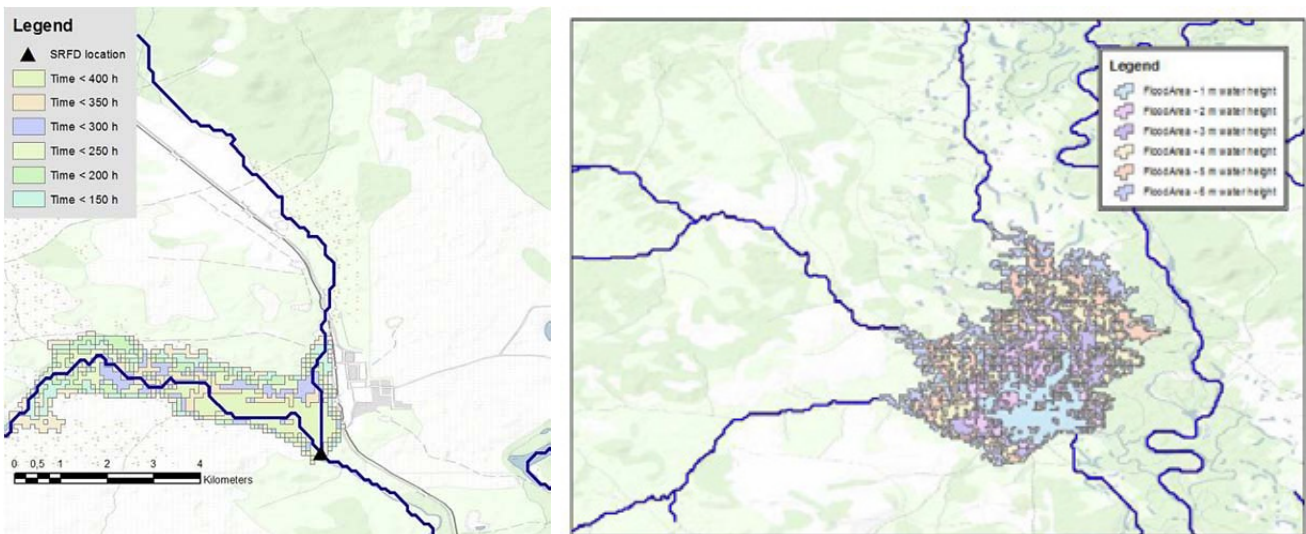
На рис. 2 (слева) представлен фрагмент космического снимка участка реки Нора – бокового притока реки Селемджи, на которой предполагается строительство большой гидроэлектростанции. Видно насколько широка пойма и как сильно меандрирует река, что говорит о неустойчивом русле. Это же видно на рис. 2 (справа), где представлен фрагмент ЦМР на ту же область и синтетические реки. Очевидно, что поиск места для створа СПГ является непростой задачей и такой выбор лучше проводить интерактивно, с участием специалиста, который выбирает пробные створы.

Использование ГИС-моделирования позволяет рассмотреть варианты регулирования паводковых расходов с детальным анализом возможных зон затопления в верхнем и нижнем бьефе гидроузлов с учетом социально-эколого-экономических факторов и климатических изменений. Результаты моделирования зон затопления представлены на рис. 3. На рис. 3 (слева) представлены результаты расчета времени затопления при катастрофическом длительном паводке для створа СПГ с определёнными параметрами (высота плотины и размер водопропускных отверстий). На рис. 3 (справа) показаны зоны затопления при различных высотах плотины СПГ. На рисунках зоны затопления представлены в виде растрового слоя – размер ячейки примерно 100 м на 100 м. Хорошо видно сложная структура зон затопления.

На рис. 3 видно, что структура зон затопления для данного региона сложная и неудачный выбор створа СПГ может потребовать использования достаточной широкой плотины, что экономически неоправданно. Здесь представлены результаты апробации разработанных программных средств и предложенной методики. Было выявлено, что простая оцифровка речной сети не позволяет адекватно проводить моделирование гидрологический процессов в среде ГИС. Так, только использование синтетических рек, проведенных строго по тальвегам, позволяет автоматически формировать в среде ГИС водосборные бассейны путем указания точки на реке.



**Рис. 2.** Исследуемый речной бассейн. Слева – фрагмент снимка из космоса. Справа – ЦМР и синтетические реки (в легенде – высоты в метрах)



**Рис. 3.** Результаты моделирования зон затопления. Пояснения в тексте

Следует отметить, что гидрологическое моделирование в сред ГИС, накладывает определенные ограничения на ЦМР, но используемые подходы носят достаточно специфический характер и их обсуждение выходит за рамки данной публикации.

**Выводы:**

управление паводковыми расходами речного бассейна распределенной системой гидроузлов позволяет решать проблемы минимизации их воздействия на природную среду;  
 результаты апробации разработанных программных средств и предложенного геоинформационного обеспечения методики выбора створов противопаводковых гидроузлов являются положительными;

показано, при решении поставленной задачи необходимо использование синтетических рек, проведенных строго по тальвегам, что позволяет согласовать речную сеть и ЦМР; определены зоны затопления земель в виде тематических карт, в зависимости параметров противопаводкового гидроузла при прохождении паводков различной обеспеченности.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-17-00050).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kauffeldt A., Wetterhall F., Pappenberger F., Salamon P., Thielen J. Technical review of large-scale hydrological models for implementation in operational flood forecasting schemes on continental level. *Environmental Modelling & Software*, 2016. V. 75. N 1. Pp. 68–76.
2. Avakyan A.B., Istomina M.N. Flooding as a planetary-scale phenomenon. *Power Technology and Engineering*, 2001. V. 35. Pp. 89–93.
3. Федоров М.П., Масликов В.И. Снижение риска наводнений в речном бассейне регулированием паводков распределенными на водосборе гидроузлами. – *Известия Российской академии наук. Энергетика*, 2013. № 4. С. 47–52.
4. Fedorov M.P., Bogolyubov A.G. and Maslikov V.I. Environmental safety of power plants using renewable sources of energy. *Hydrotechnical Construction*, 1995. 29. Pp. 353–357.
5. Arefiev N., Nikonova O., Badenko N., Ivanov T., Oleshko V. Development of automated approaches for hydropower potential estimations and prospective hydropower plants siting. – «ENVIRONMENT. TECHNOLOGY. RESOURCES» Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference, Prague, 2015. Pp. 41–50.
6. Arefiev N., Terleev, V., Badenko V. GIS-based fuzzy method for urban planning. *Procedia Engineering*, 2015, №. 117. Pp. 39–44.
7. Badenko V., Arefiev N. Estimation of Wind Energy Potential of the Territory. *Applied Mechanics and Materials*, 2014. v. 617. Pp. 302–306.
8. Kurtener D., Badenko V. A GIS methodological framework based on fuzzy sets theory for land use management. *J. Braz. Comp. Soc.*, 2000. Vol. 6. No. 3. Pp. 26–35.
9. Arefiev N.V., Badenko V.L., Osipov G.K. Basin-landscape approach to the organization of environmental monitoring of hydropower complexes on the basis of geographical information technologies. – *Power Technology and Engineering*, 1998. № 32. Pp. 660–663.

---

V.L. Badenko<sup>1</sup>, V.I. Maslikov<sup>2</sup>, M.P. Fedirov<sup>3</sup>, A.N. Chusov<sup>4</sup>

### GEOINFORMATION SUPPORT FOR THE METHOD OF SITE SELECTION FOR FLOOD REGULATION DAMS

**Abstract.** *Methods for reducing of the flooding risk by distributed system of self-control dams on a river basin are analyzed. A geoinformation method to justify the parameters selection of such self-control dams, including a dam site location, to minimize impact on the environment (ecological factor) is proposed. The results of testing are shown on the example of the Amur region.*

---

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Civil Engineering, Water Resources and Hydrotechnical Engineering chair, Saint-Petersburg, 195251, Russia, professor; e-mail: vbadenko@gmail.com.

<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Civil Engineering, Civil Engineering and Applied Ecology chair, Saint-Petersburg, 195251, Russia, professor; e-mail: vmaslikov@list.ru.

<sup>3</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Civil Engineering, Civil Engineering and Applied Ecology chair, Saint-Petersburg, 195251, Russia, professor; e-mail: m.fedorov@spbstu.ru.

<sup>4</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Civil Engineering, Civil Engineering and Applied Ecology chair, Saint-Petersburg, 195251, Russia, head, ass. Professor; e-mail: chusov17@mail.ru.

**Key words:** flash floods, modeling in a GIS environment, geoinformation support, spatial analysis.

**Acknowledgement.** The study was supported by Russian Foundation for Basic Research (project 16-17-00050).

## REFERENCES

1. large-scale hydrological models for implementation in operational flood forecasting schemes on continental level. *Environmental Modelling & Software*, 2016. V. 75. N 1. Pp. 68–76.
  2. *Avakyan A.B., Istomina M.N.* Flooding as a planetary-scale phenomenon. *Power Technology and Engineering*, 2001. V. 35. Pp. 89–93.
  3. *Fedorov M.P., Maslikov V.I.* Snizhenie riska navodnenij v rechnom bassejne regulirovaniem pavadkov raspredelennymi na vodosbore gidrouzlami [Reducing the risk of flooding in the river basin by flood management using distributed hydrosystems]. – *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika*, 2013. № 4. Pp. 47–52 (in Russian).
  4. *Fedorov M.P., Bogolyubov A.G. and Maslikov V.I.* Environmental safety of power plants using renewable sources of energy. *Hydrotechnical Construction*, 1995. 29. Pp. 353–357.
  5. *Arefiev N., Nikonova O., Badenko N., Ivanov T., Oleshko V.* Development of automated approaches for hydropower potential estimations and prospective hydropower plants siting. – «ENVIRONMENT. TECHNOLOGY. RESOURCES» Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference, Prague, 2015. Pp. 41–50.
  6. *Arefiev N., Terleev, V., Badenko V.* GIS-based fuzzy method for urban planning. *Procedia Engineering*, 2015. № 117. Pp. 39–44.
  7. *Badenko V., Arefiev N.* Estimation of Wind Energy Potential of the Territory. *Applied Mechanics and Materials*, 2014. V. 617. Pp. 302–306.
  8. *Kurtener D., Badenko V.* A GIS methodological framework based on fuzzy sets theory for land use management. *J. Braz. Comp. Soc.*, 2000. Vol. 6. No. 3. Pp. 26–35.
  9. *Arefiev N.V., Badenko V.L., Osipov G.K.* Basin-landscape approach to the organization of environmental monitoring of hydropower complexes on the basis of geographical information technologies. – *Power Technology and Engineering*, 1998. № 32. Pp. 660–663.
-