

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНУТРИВОДОЕМНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОЗЕРЕ ХАНКА

С.В. Катрасов¹, А.Н. Бугаец¹, В.В. Шамов¹

¹Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, ул. Радио, 7, г. Владивосток, 690041, Россия.

E-mail: sergey_katrasov@mail.ru

С использованием данных дистанционного зондирования Земли Landsat и геоинформационной системы QGIS выделены зоны современного затопления северо-восточного побережья и прилегающей поймы оз. Ханка, выявлена формирующаяся в последние годы протока, соединяющая оз. Ханка и р. Сунгача, определены районы разрушения водозащитных сооружений, осуществлявших регулирование водного режима пойменных территорий. Средствами программного комплекса Delft3D Flow выполнено моделирование гидродинамических процессов в озере с учетом влияния поверхностного притока и комплекса гидрометеорологических условий в районе исследования.

PRELIMINARY RESULTS OF THE MODELLING OF HYDROLOGICAL PROCESSES IN THE KHANKA LAKE

S.V. Katrasov¹, A.N. Bugaets¹, V.V. Shamov¹

¹Pacific Geographical Institute FEB RAS, Radio Str., 7, Vladivostok, 690041, Russia.

E-mail: sergey_katrasov@mail.ru

Using Landsat remote sensing data and QGIS geographic information system, the zones of modern flooding of the northeastern coast and the adjacent floodplain of the Khanka Lake were identified; the channel connecting the lake and the Sungacha R., which was formed in recent years, was revealed. The areas of destruction of the water protection constructions that regulated the water regime of the floodplains were determined. The Delft3D Flow software package was used to model hydrodynamic processes in the lake, taking into account the influence of surface inflow and combinations of hydrometeorological conditions in the study area.

Изменения климата, такие как повышение температуры воздуха и смена режима осадков, существенно влияют на приток вод в озера и реки, являясь причиной трансформации гидрологических режимов водных объектов, что, в свою очередь, влияет на водные ресурсы и экосистемы (Milly et al., 2005). Увеличение притока вод способно привести к усилению эрозии берегов, а также к изменению химического состава воды, что негативно сказывается на состоянии озерных экосистем (Carpenter et al., 1998). Для рек, дренирующих котловины частично спущенных озер, и под воздействием увеличенного притока интенсивно деформирующих свое русло, мониторинг подобных процессов представляет особый интерес. К такому типу рек относится река Сунгача, левый приток р. Уссури (Губарева, 2015).

Протяженность р. Сунгача составляет 212 км, площадь водосбора без водосбора оз. Ханка – 3541 км². Исток реки расположен в северо-восточной части оз. Ханка (рис. 1).

Долина р. Сунгача состоит из трёх морфологически однородных участков, соответствующих верхнему, среднему и нижнему течению. Границы участков совпадают с местами впадения ее основных притоков: р. Белая (87 км от устья) и р. Чёрная (37 км от устья) (Стоценко, Черненко, 1958). Сунгача относится к рекам с высокой водностью в теплое время года и паводочным режимом, обусловленным обильными осадками в летне-осенний период. Основное влияние на уровенный режим данной реки оказывает естественный регулятор стока реки – оз. Ханка.

Цель настоящего исследования – анализ условий затопления поймы р. Сунгача в районе ее истока, а также оценка на основе сценарных расчётов параметров гидродинамического режима озера Ханка с помощью трёхмерной гидродинамической модели с вариантами комбинирования гидрометеорологических факторов.

Гидрологический режим р. Сунгача определяется основными чертами муссонного типа умеренного климата (Губарева, 2015). В холодный период года здесь преобладают ветры северных румбов, что определяет достаточно холодную и сухую погоду. Среднегодовая температура воздуха в данном районе составляет плюс 3–4 °С, максимальная – плюс 37–38 °С (июль–август), минимальная – опускается до минус 40 °С (январь). Среднегодовая сумма осадков составляет около 600 мм, годовые максимумы находятся в диапазоне 950–1050 мм. Большая часть осадков (70 % годовой суммы и более) выпадает в тёплый период – с апреля по октябрь.

Средняя за многолетие площадь водной поверхности оз. Ханка составляет около 4070 км², средняя глубина озера – 4–5 м, максимальная – около 11 м. Длина озера вдоль меридионального направления составляет около 90 км, наибольшая ширина – около 70 км. Российская часть площади водосбора озера занимает около 17000 км².

В последние десятилетия отмечается устойчивая тенденция повышения уровня воды в оз. Ханка с затоплением прилегающих к озеру территорий и размывом берегов (Бортин, Горчаков, 2016; Болгов, 2016; Бакланов и др., 2019; Махинов, 2020). Это повышение обусловлено различными, в том числе и климатическими факторами (Пономарев и др., 2016; Трофимчук, 2025). Для оценки влияния этих процессов на сток озерных вод по р. Сунгача авторами были выделены затопленные территории на водосборах оз. Ханка и в верхнем течении р. Сунгача с помощью данных дистанционного зондирования (ДДЗ) Landsat за 4-летний период: с 1 января 2018 г. по 31 декабря 2021 г.

Движение водных масс в крупных водоёмах считается сильным, а часто и решающим фактором функционирования и состояния озёрных экосистем. Вместе с тем гидродинамика водоёма является результатом наложения многих разномасштабных процессов и, как следствие, сложным предметом исследований. Оз. Ханка – не исключение, более того, разделение его акватории государственной границей осложняет организацию комплексных наблюдений за его режимом. В связи с этим метод математического моделирования представляется весьма эффективным инструментом исследования динамики водных масс озера с учётом сильной изменчивости метеорологических условий, притока воды в озеро, приливных сил.

Средствами моделирующего программного комплекса Delft3D Flow (Deltares, 2013) было выполнено гидродинамическое моделирование процессов в оз. Ханка; в геоинформационной системе QGIS (Longley et al., 2015) выполнены обработка и анализ полученных данных. Для оценки площади затопления в северо-восточной



Рис. 1. Водосборы оз. Ханка (1) и р. Сунгача (2) с притоками. Чёрной линией обозначены границы водосборов, синими линиями – гидрографическая сеть

части побережья оз. Ханка проведена обработка ДДЗ Landsat-8 с помощью комбинирования 4-го, 5-го и 3-го каналов, с получением геопривязанных данных контрастного отображения участков вода/суша в формате GeoTIFF и последующей обработкой средствами ГИС. В результате применения соответствующих процедур были получены следующие значения площадей затопления территории в районах Гнилых озёр и верхнего течения р. Сунгача: в 2018 г. – 43,12 км², в 2019 г. – 100,90 км², в 2020 г. – 143,08 км², в 2021 г. – 67,70 км², что соответствует динамике изменения уровня воды в оз. Ханка на гидрологическом посту (гп) Астраханка (рис. 2).

На участке водообмена Гнилых озёр и оз. Ханка в результате подъема уровня воды и воздействия ветровых течений активизировались эрозионные процессы, сформировавшие значительную протоку, которая обеспечила свободный водообмен между озерами. Частично разрушенные гидротехнические сооружения, построенные около 40–50 лет назад, в настоящее время не обеспечивают изоляцию Гнилых озёр

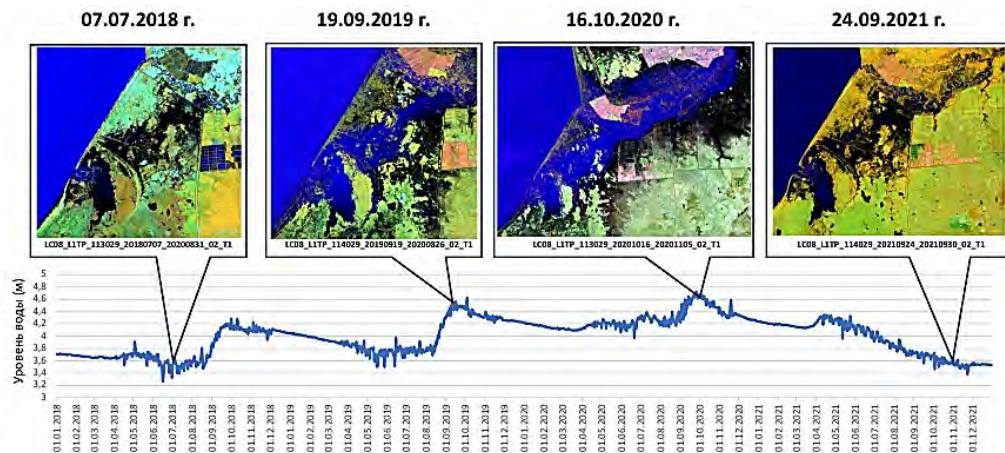


Рис. 2. Межгодовая динамика уровня воды (м) оз. Ханка на гп Астраханка в 2018–2021 гг., сопоставленная с ДДЗ Landsat-8 (фотоснимки)

от долины р. Сунгача в верхнем течении, что привело к формированию протоки между ними (рис. 3).

В целях оценки влияния гидрометеорологических факторов на гидродинамические процессы в районе исследования в данной работе использованы гидродинамические поля, рассчитанные с помощью трехмерной модели Delft3D Flow за период с 01.01.2018 по 31.12.2021 гг. Метеорологическое воздействие на поверхность задано на основе архивных данных реанализа ERA-5. В качестве основы для построения цифровой модели рельефа дна использована навигационная карта озера Ханка. Для процедуры моделирования построена прямолинейная расчётная сетка 460 x 398 ячеек. Горизонтальное разрешение модельной сетки составляет 200 м, вертикальное разрешение сетки – пять σ -слоев, внешние границы которых установлены на расстоянии в 15 % от поверхности воды и от дна озера. Скорость и направление ветра, изменение атмосферного давления заданы с дискретностью 1 час, остальные параметры – с суточным разрешением.

В результате моделирования получено пространственное распределение полей скоростей течений и уровня озера с учетом атмосферных осадков и стока крупных рек, впадающих в оз. Ханка (рр. Комиссаровка, Мельгуновка, Илистая и Спасовка). В модели не учитывалось наличие водозащитных сооружений и возможного сброса/забора воды из оз. Малая Ханка со стороны КНР (Xiao et al., 2023).

На рис. 4 представлен график колебаний измеренных и рассчитанных значений уровней воды оз. Ханка. Коэффициент детерминации между ними составляет 0,93.

Пример поля скоростей течений на 6 часов местного времени 15.09.2019 г. приведен на рис. 5.

Таким образом, в результате расчетов с применением трехмерной модели Delft3D Flow с привлечением данных метеорологических и гидрологических наблюдений для расчетного периода с 01.01.2018 по 31.12.2021 гг. было получено пространственное распределение полей скоростей течений и уровня оз. Ханка. Рассчитано и подтверждено спутниковыми снимками образование новой протоки, соединяющей озеро и район истока р. Сунгача и обеспечивающей устойчивый водообмен между ними через систему Гнилых озер, кардинально меняет прежний (примерно до 2010 года) гидрологический режим р. Сунгача, усиливает эрозию северо-восточного берега оз. Ханка, способствует аккумуляции в этом районе взвешенного вещества и в целом приводит к снижению устойчивости экосистемы водно-болотных угодий на части низкой поймы озера и р. Сунгача (Keddy, Fraser, 2000; Poff, Zimmerman, 2010; Reddy, DeLaune, 2008).

Учёт указанных процессов необходим для комплексной геоэкологической оценки последствий негативных воздействий на экосистему, а также для обоснования мероприятий по обеспечению устойчивого управления природными ресурсами в пределах бассейна трансграничного оз. Ханка. Дальнейшие исследования, в частности, направлены на проведение модельных оценок вероятных объемов сбросов и забора воды из оз. Малая Ханка для хозяйственных целей на территории КНР.

Работа выполнена при поддержке РНФ (российско-китайский проект № 25-47-00022).

Литература

- Бакланов П.Я., Качур А.Н., Ермошин В.В., Коженкова С.И., Махинов А.Н., Бугаец А.Н., Базарова В.Б., Ким В.И., Шамов В.В. 2019. Современные геоэкологические проблемы в бассейне озера Ханка // География и природные ресурсы. № 4 (158). С. 33–43. (Baklanov P.Y., Kachur A.N., Ermoshin V.V., Kozhenkova S.I., Bugaets A.N., Bazarova V.B., Shamov V.V., Makhinov A.N.,

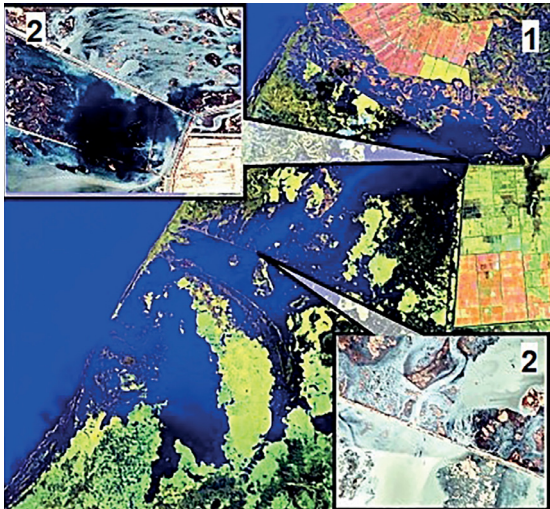


Рис. 3. Вновь образовавшаяся протока между оз. Ханка и верхним течением р. Сунгача через урочище Гнилые озера: (1) черный цвет – подтопленные участки, синий цвет – открытая вода, (2) разрушенные гидротехнические сооружения

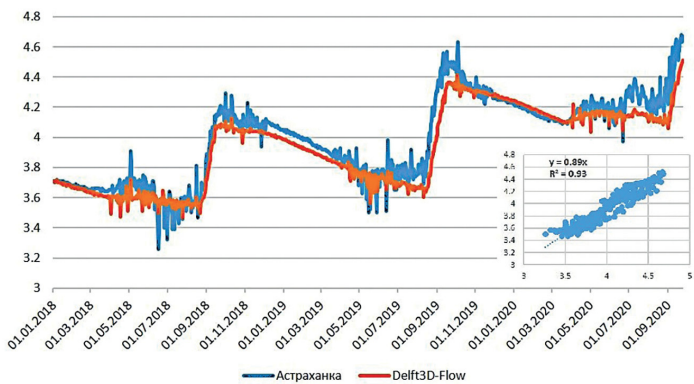
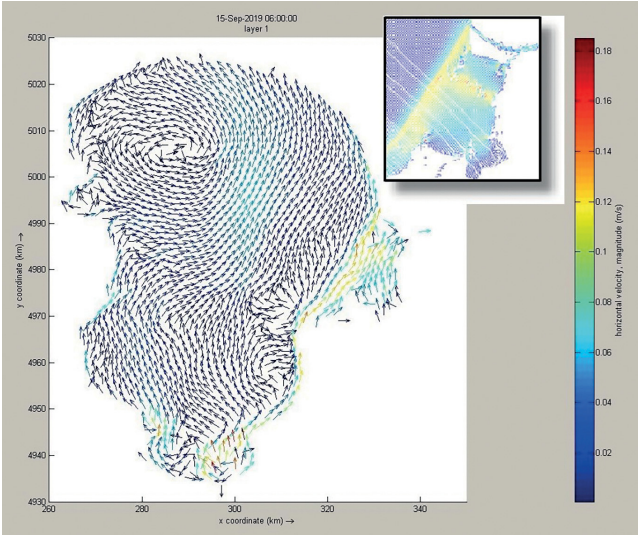


Рис. 4. Многолетняя динамика уровней воды в оз. Ханка на гп Астраханка и его модельные значения. На врезке показан график связи измеренных (по горизонтали) и рассчитанных по модели (по вертикали) значений уровней воды

Рис. 5. Результат моделирования гидродинамических процессов о. Ханка и в районе между о. Ханка и верхним течением р. Сунгача (1) (3-σ слой, 06.00 15.09.2019 г.). На врезке показано поле скоростей в районе истока р. Сунгача (восточная часть озерной поймы)



- Kim V.I. Current geo-ecological problems within the Lake Khanka drainage basin. *Geography and Natural Resources*. 2019. V. 40. No. 4. Pp. 325–334. DOI: 10.1134/S1875372819040048)
- Болгов М.В. 2016.** Экстремальные уровни озера Ханка: природные вариации или антропогенное воздействие? // *Вестник ОНЗ РАН*. Т. 8, NZ1001. 14 с.
- Бортин Н.Н., Горчаков А.М. 2016.** Анализ факторов неустойчивости режима озера Ханка // *Трансграничное озеро Ханка: причины повышения уровня воды и экологические угрозы*. Владивосток: Дальнаука. С. 31–41.
- Губарева Е.К. 2015.** Развитие и современная динамика русла реки Сунгачи // *Геоморфология*. № 4. С. 50–59.
- Махинов А.Н. 2020.** Озеро Ханка: подъем уровня воды, его масштабы и последствия // *Природа*. 2020. № 11 (1263). С. 37–45.
- Пономарев В.И., Дмитриева Е.В., Шкорба С.П., Карнаухов А.А. 2016.** Аномалии в районе озера Ханка, на Дальнем Востоке и в Сибири, как следствие изменения климатического режима в АТР на рубеже 20–21 веков // *Трансграничное озеро Ханка: причины повышения уровня воды и экологические угрозы*. Владивосток: Дальнаука. С. 41–52.
- Стоценко А.В., Черненко А.Г. 1958.** Гидрометеорологическое описание рек Приханкайской равнины и сопредельных районов // *Материалы по физической географии юга Дальнего Востока*. М.: Изд-во АН СССР. С. 179–254.
- Трофимчук М.М. 2025.** Циклические процессы в водных экосистемах // *Метеорология и гидрология*. № 1. С. 5–13. (Trofimchuk M.M. Cyclic processes in aquatic ecosystems. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2025. V. 50. No. 1. Pp. 1–7.
- Carpenter S.R., Caraco N.F., Correll D.L., Howarth R.W., Sharpley A.N., Smith V.H. 1998.** Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen // *Ecol. Appl.* V. 8(3). Pp. 559–568.
- Deltares, 2013.** Delft3D Flow. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. 2013. User Manual. Hydro-Morphodynamic. Version 3.15.30932. Delft – Netherlands.
- Keddy P.A., Fraser L.H. 2000.** Ecology of Wetland Plants // *Wetlands Ecology and Management*. N 8(1). P. 1–18.
- Longley P.A., Goodchild M.F., Maguire D.J., Rhind D.W. 2015.** Geographic Information Science and Systems. John Wiley & Sons. 560 p.
- Milly P., Dunne K., Vecchia A. 2005.** Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*. V. 438. P. 347–350.
- Poff N.L., Zimmerman J.K.H. 2010.** Ecological responses to flow alteration in the rivers of the United States. *Freshwat. Biol.* V. 55(1). P. 24–36.
- Reddy K.R., DeLaune R.D. 2008.** Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications. First ed. CRC Press. 800 p.
- Xiao F., Wang X., Fu C.** Impacts of land use/land cover and climate change on hydrological cycle in the Xiaoxingkai Lake Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2023. No. 47: 101422. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101422>.