

УСЛОВИЯ ОБИТАНИЯ ПРОМЫСЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.552(282.257.583.1):639.21

Ю.И. Зуенко, М.Е. Шаповалов, А.С. Курносова*

Тихоокеанский филиал ВНИРО (ТИНРО),
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ОЗЕРА ХАНКА
И ИХ ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ ПРОМЫСЛОВЫХ РЕСУРСОВ

По спутниковым альтиметрическим данным рассмотрены изменения уровня оз. Ханка, отмечен его экстремальный рост в последние годы с максимумом в 2016 г. С помощью простой балансовой модели определен вклад компонент водного баланса озера в современное повышение уровня. Сделан вывод, что изменение количества летних осадков является основной причиной колебаний уровня озера, хотя в последние годы наблюдаются случаи дополнительного притока воды в озеро либо изъятия части притока, а также ухудшение стока из него, что влияло на уровень. Согласно расчетам, за 2014–2015 гг. озеро получило дополнительно, сверх естественного притока, около 1,3 км³ воды, что способствовало достижению максимально высоких значений его уровня. Однако в предыдущие и последующие годы приток был ниже естественного, предположительно вследствие изъятия и перенаправления части водосбора озера в другие водоемы: в частности, за 2016–2018 гг. озеро недополучило 2,1 км³ воды. Показано положительное влияние роста уровня озера на состояние запасов промысловых видов рыб. При этом отмечено, что условия высокого уровня более благоприятны для воспроизводства фитофильных видов (амурский сазан *Cyprinus rubrofuscus* и др.), в то время как численность пелагофильных видов (верхогляд *Chanodichthys erythropterus*) снижается.

Ключевые слова: уровень озера, водный баланс, балансовая модель, озеро Ханка, амурский сазан, верхогляд.

DOI: 10.26428/1606-9919-2020-200-935-950.

Zuenko Y.I., Shapovalov M.E., Kurnosova A.S. Recent changes of water level in Lake Khanka and their consequences for its fisheries resources // *Izv. TINRO*. — 2020. — Vol. 200, Iss. 4. — P. 935–950.

Interannual variation of the water level in Lake Khanka is considered on satellite altimetry data; its extreme rising in recent years is noted, with the maximum in 2016. Using a simple balance model, contribution of the main components of its water balance to the modern rise is determined, as precipitation in its basin, evaporation, and water discharge through the Sungacha River. Growth of summer precipitation is defined as the main reason of the level rising. However, the water income to the lake does not correlate with the precipitation volume since 2010 that

* Зуенко Юрий Иванович, доктор географических наук, заведующий лабораторией, e-mail: zuenko_yury@hotmail.com; Шаповалов Максим Евгеньевич, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: maksim.shapovalov@tinro-center.ru; Курносова Анна Сергеевна, ведущий специалист, e-mail: anna.vazhova@gmail.com.

Zuenko Yury I., D.Geogr., head of laboratory, Pacific branch of VNIRO (TINRO), 4, Shevchenko Alley, Vladivostok, 690091, Russia, e-mail: zuenko_yury@hotmail.com; Shapovalov Maksim E., Ph.D., leading researcher, Pacific branch of VNIRO (TINRO), 4, Shevchenko Alley, Vladivostok, 690091, Russia, e-mail: maksim.shapovalov@tinro-center.ru; Kurnosova Anna S., leading specialist, Pacific branch of VNIRO (TINRO), 4, Shevchenko Alley, Vladivostok, 690091, Russia, e-mail: anna.vazhova@gmail.com.

confirms the hypothesis about artificial influence on the water balance of Lake Khanka by its connection with the Mulin River (China) and worsening of the outflow through the Sungacha. As the result, the lake got additionally about 1.3 km³ in 2014–2015 that promoted the level rise to the highest mark. But before and after this period, the water inflow was lower than its expected values, obviously because of its redistribution. Positive influence of the anomalous water level growth on total abundance of commercial fish species is shown. The high level is favorable for reproduction of phytophilic species (*Cyprinus rubrofasciatus*), whereas abundance of pelagophilic species (*Chanodichthys erythropterus*) declines.

Key words: water level, water balance, balance modeling, Lake Khanka, Xīngkǎi Hú, *Cyprinus rubrofasciatus*, *Chanodichthys erythropterus*.

Введение

Крупное, но мелководное оз. Ханка находится в центре обширной Ханкайской низменности, климат которой характеризуется умеренным количеством осадков (около 600 мм/год). Сток из озера ограничен пропускной способностью русла небольшой равнинной р. Сунгача, притока Уссури. Эти факторы предопределяют значительные колебания уровня озера в зависимости от режима осадков, в результате которых его объем и площадь значительно меняются [Васьковский, 1978]. Озеро является важнейшим рыбопромысловым водоемом Приморья, имеет рекреационное значение, а также используется для сброса вод с рисовых полей. При этом оз. Ханка (по-китайски 兴凯湖 [Xīngkǎi Hú]) является трансграничным водоемом между Россией и КНР и его ресурсы активно эксплуатируются обеими странами.

Циклические изменения уровня воды являются характерной природной особенностью оз. Ханка, однако быстрый рост уровня в течение 2010–2015 гг. и его высокое положение в последние годы, превышающее все ранее достигнутые максимальные отметки, привлекли внимание общественности, властей и научного сообщества, выявив недостаточность знаний о гидрологическом режиме озера (рис. 1). Современный подъем уровня озера привел к затоплению прибрежных жилых и хозяйственных территорий, разрушению некоторых береговых сооружений. Существенно повлиял необычно высокий уровень и на функционирование экосистемы озера, состояние его биологических ресурсов. Феномен высокого уровня до сих пор не получил однозначного объяснения, выдвинуто лишь несколько весьма различных гипотез.

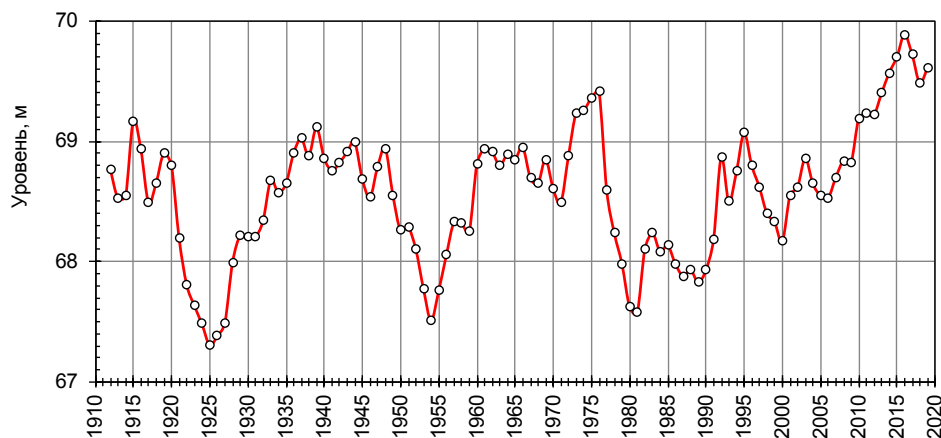


Рис. 1. Межгодовые изменения уровня оз. Ханка в Балтийской системе высот (от нуля Кронштадтского футштока). Значения для 2018–2019 гг. восстановлены по спутниковым альтиметрическим данным

Fig. 1. Interannual changes of the level in Lake Khanka relative to the sea level (Baltic height system). The values for 2018–2019 are restored on the base of satellite altimetry data

С целью количественной оценки вклада природных и других компонент водного баланса в современный подъем уровня оз. Ханка выполнены балансовое моделиро-

вание межгодовых изменений уровня озера и интерпретация его результатов. Кроме того, по данным рыбопромыслового мониторинга определено влияние экстремального подъема уровня на биологию и состояние запасов основных промысловых видов рыб, обитающих в озере.

Материалы и методы

Данные об уровне оз. Ханка получены по результатам спутниковой альтиметрии с аппаратов TOPEX/POSEIDON, OSTM, Jason-1 и Jason-2, выполняемой с октября 1992 г. Аномалии уровня, рассчитанные по стандартному алгоритму, представлены на сайте Foreign Agricultural Service (США): <https://ipad.fas.usda.gov> с месячной дискретностью. Средние годовые аномалии уровня получены осреднением измеренных значений за период с января по декабрь.

В качестве характеристики режима осадков в водосборном бассейне оз. Ханка использованы данные о количестве осадков на метеостанции «Астраханка», расположенной на его берегу, доступные на сайте: <http://www.pogodaiklimat.ru/>. Разумеется, данные по осадкам лишь на одной метеостанции неточно характеризуют весь водосбор озера, что вносит ошибку в расчеты, результаты которых по этой причине можно считать приближенными. Данные измерений испарения с поверхности озера и стока рек, выпадающих и него, в работе не использовались.

Для характеристики промысловых ресурсов озера рассмотрены изменения состояния популяций основных промысловых видов рыб, для которых ежегодно устанавливаются лимиты общего допустимого улова (ОДУ):

- сазан амурский *Cyprinus rubrofuscus* LaCepede, 1803;
- верхогляд *Chanodichthys erythropterus* (Basilewsky, 1855);
- карась серебряный *Carassius gibelio* (Bloch, 1782);
- краснопер монгольский *Chanodichthys mongolicus* (Basilewsky, 1855);
- сом амурский *Parasilurus asotus* (Linnaeus, 1758);
- щука амурская *Esox reichertii* Dybowski, 1869;
- горбушка *Chanodichthys oxycephalus* (Bleeker, 1871);
- конь пятнистый *Hemibarbus maculatus* Bleeker, 1871.

Кроме перечисленных видов, объектами рыбного промысла на оз. Ханка являются судак *Sander lucioperca* (Linnaeus, 1758) и два вида толстолобиков — пестрый *Hypophthalmichthys nobilis* (Richardson, 1845) и белый *Hypophthalmichthys molitrix* (Valenciennes, 1844), однако в данном исследовании динамика состояния их запасов не рассматривается, поскольку молодь толстолобиков искусственно вселяется китайскими рыбоводами, а судак интродуцирован в озере сравнительно недавно, и его численность стремительно растет вне связи с изменениями условий обитания. При этом между судаком и верхоглядом, питающимися востробрюшкой и креветками, пока не возникает серьезной конкуренции в связи с высокой численностью этих кормовых объектов. Не рассматривается и состояние популяций наиболее массовых, но мелкоразмерных (не облавливаемых крупноячеистыми сетями) непромысловых видов рыб: уссурийской востробрюшки *Hemiculter lucidus* (Dybowski, 1872), корейской востробрюшки *Hemiculter leucisculus* (Basilewsky, 1855) и укля *Culter alburnus* Basilewsky, 1855, так как мониторинг их запасов в озере не ведется.

В качестве основного показателя состояния промысловых популяций использован средний годовой улов на единицу усилия (килограмм на 100 м сети в сутки) для стандартной ставной крупноячеистой сети высотой 2 м с шагом ячеи 50–80 мм в сетепостановках, круглогодично выполняемых ТИНРО в юго-западной и центральной частях оз. Ханка при проведении мониторинга состояния его биоресурсов. Ежегодно выполняется порядка 50–100 таких учетных сетепостановок. Показатель улова на усилие является стандартной промысловой характеристикой, используемой с середины 1990-х гг. для количественной оценки изменений, происходящих в ихтио-

цене озера. До этого времени общий и промысловый запас массовых промысловых видов определялся методами прямого учета; межгодовые флюктуации запаса хорошо коррелировали с изменениями уловов на усилие. Следует отметить, что для оз. Ханка, как трансграничного водоема, оценки запаса условны, так как относятся только к доступной для учета российской части акватории. В последние десятилетия тенденции в изменении запасов массовых видов оцениваются по изменениям уловов на усилие, с учетом данных промысловой статистики и экспертных оценок неконтролируемого вылова (неконтролируемый вылов как российскими, так и китайскими рыбаками значительно, почти на порядок, превышает официальный вылов [Шаповалов, 2016]).

Для оценки влияния изменений отдельных компонент водного режима оз. Ханка на межгодовые изменения его уровня H применена балансовая модель вида

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{S} (V_p - V_d - V_e), \quad (1)$$

где S — площадь водного зеркала, а V_p , V_d , V_e — объемы воды, поступающие в озеро и изымаемые из него за единицу времени (год) в результате, соответственно, осадков на всей площади водосбора, стока и испарения с поверхности озера. Предварительно установлен вид уравнения и сделан вывод, что благодаря большой площади озера можно пренебречь его нелинейностью, обусловленной изменением площади зеркала при изменениях уровня воды, и считать связь уровня с водным балансом линейной, так как ошибки неучета нелинейности не превышают 1 % при уклоне дна $> 1^\circ$. Поскольку испарение является наименее существенной компонентой водного баланса, которая в норме не превышает 3 %, его межгодовые изменения не учитывались, т.е. V_e принят константой. Объем воды, поступающий в озеро, пропорционален количеству осадков P , т.е. $V_p = aP + p$, где a , p — эмпирические коэффициенты. Сток из озера по р. Сунгача, следуя оценкам, приведенным в работе Н.Н. Бортина, А.М. Горчакова [2016], в норме имеет экспоненциальную зависимость от уровня озера, что, по-видимому, обусловлено нелинейным увеличением сечения русла реки с ростом уровня, т.е. $V_d = be^{cH}$ (рис. 2).

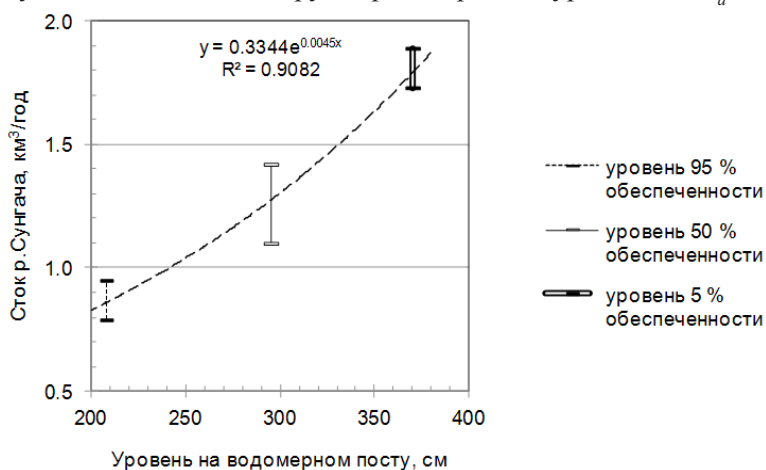


Рис. 2. Оценки годового стока р. Сунгача при характерных значениях уровня оз. Ханка по обобщенным данным инструментальных наблюдений [по: Бортин, Горчаков, 2016]

Fig. 2. Estimations of annual water discharge through the Sungacha River for typical states of the level in Lake Khanka, by generalized data of instrumental measurements [from Bortin, Gorchakov, 2016]

Задача оценки влияния отдельных компонент сводится к обратному решению уравнения (1) относительно V_p и V_d путем решения систем уравнений водного баланса вида

$$S(H_{i+1} - H_i) = aP_i + (p - V_e) - be^{cH_i}, \quad (2)$$

для разных пар лет i и $i+1$. Поскольку в уравнении (2) четыре неизвестных — a , b , c и $(p - V_e)$, для решения системы достаточно иметь данные об уровне озера, его изменении и осадках за 4 года.

Сравнение межгодовых изменений обилия промысловых видов рыб с изменениями уровня оз. Ханка проводили методами корреляционного анализа. Статистическую значимость корреляционных связей и регрессионных моделей оценивали путем статистической проверки нулевой гипотезы с помощью распределения Стьюдента.

Результаты и их обсуждение

Результаты наблюдений. Межгодовые изменения средних годовых аномалий уровня оз. Ханка по данным альтиметрии (с 1992 г.) до начала последнего десятилетия представляли собой осцилляции вокруг среднемноголетнего уровня (рис. 3). В период 2010–2016 гг. происходил быстрый, хотя и не непрерывный рост уровня, а в последние годы наблюдается нестабильный, но постоянно высокий уровень озера.

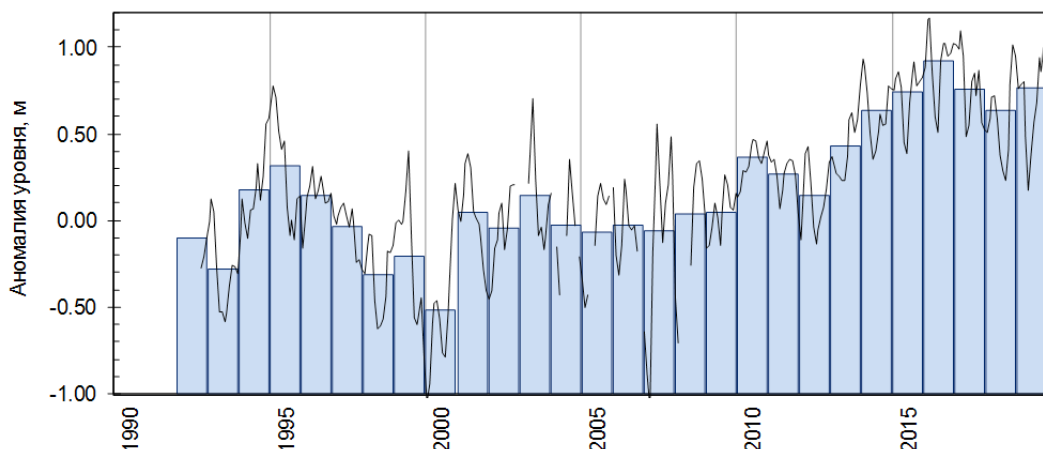


Рис. 3. Средние месячные и средние годовые аномалии уровня оз. Ханка по данным спутниковой альтиметрии

Fig. 3. Mean month and mean annual anomalies of the water level in Lake Khanka, by satellite altimetry data

Изменения уровня озера, определенные по спутниковым данным, хорошо соответствуют изменениям по данным уровневого поста, установленного в с. Астраханка в юго-западной части озера, приведенным в работе Н.Н. Бортина, А.М. Горчакова [2016] (рис. 4). Коэффициент корреляции рядов оценен в $r = 0,96$, что дает основание считать результаты альтиметрических измерений вполне репрезентативными для этой акватории. Однако средний уровень, принятый в альтиметрических расчетах, находится примерно на 22 см выше среднего уровня, рассчитанного по многолетним измерениям *in situ* (68,54 м в Балтийской системе высот), что указывает на то, что уровень озера в период спутниковых измерений был в среднем выше его среднего уровня.

Сезонный ход уровня не имеет существенного значения для изменчивости уровня оз. Ханка, хотя замечен на среднемноголетних данных (рис. 5). В среднем уровень немного повышается к концу года, что, видимо, связано со стоком в озеро выпавших за лето осадков. В конкретные годы сезонные изменения уровня озера могут быть совершенно другими, т.е. в изменчивости уровня озера доминируют межгодовые изменения, которые могут быть выделены годовым осреднением данных.

Наблюдаемое повышение уровня оз. Ханка совпало с тенденцией к росту его промысловых ресурсов: суммарные уловы на усилие всех промысловых видов в период высокого уровня во второй половине 2010-х гг. (4–7 кг/сут) примерно вдвое превышали величины этого показателя в период низкого уровня в начале 2000-х гг. (1–4 кг/сут). Можно предположить, что положительная тенденция отчасти обусловлена мерами по восстановлению запасов после перелома, допущенного в 1990-е гг., прежде всего полным запретом промысла в 2002–2006 гг. (в частности, резкий рост уловов в 2008–2009 гг.

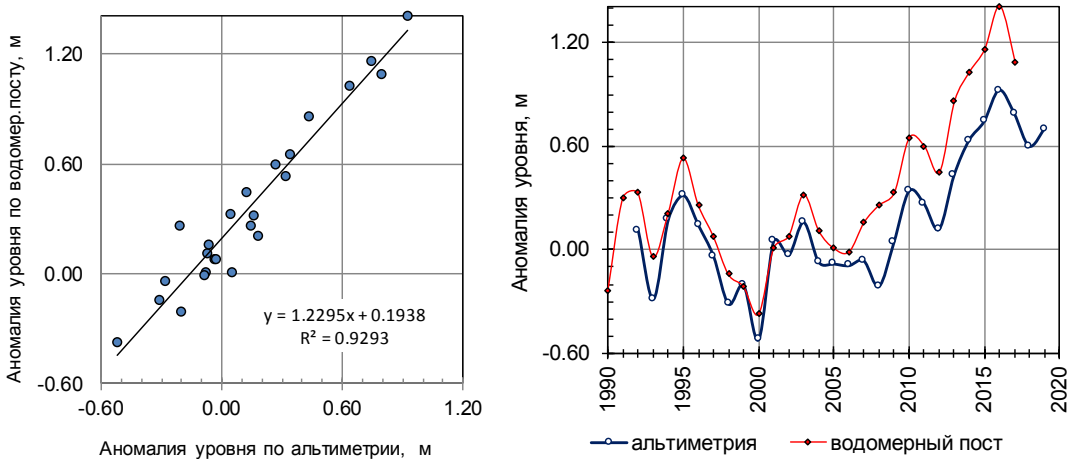


Рис. 4. Средние годовые аномалии уровня оз. Ханка по данным спутниковой альтиметрии и по данным гидрологических измерений, опубликованным Н.Н. Бортиным и А.М. Горчаковым [2016, с дополнениями для последних лет], и график линейной связи между данными разного происхождения

Fig. 4. Mean annual anomalies of the water level in Lake Khanka on the data of satellite altimetry and the data of hydrological measurements published by Bortin and Gorchakov [2016]. Linear relationship between the data of different origin is shown on the right panel

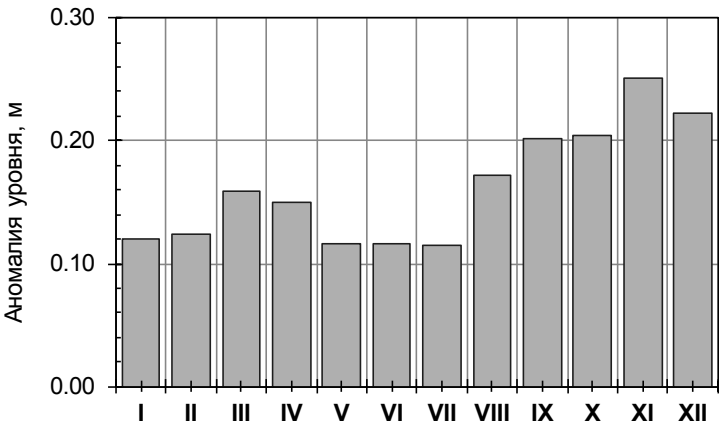


Рис. 5. Среднегодовое (1993–2019 гг.) годовое ход аномалий уровня оз. Ханка по данным спутниковой альтиметрии

Fig. 5. Seasonal variation of the water level anomalies in Lake Khanka averaged for 1993–2019, by satellite altimetry data

предположительно связан с успешным нерестом во время запрета промысла), однако примечательно, что даже циклические колебания уровня озера на фоне тренда на повышение соответствуют росту или снижению уловов при генеральной положительной тенденции, с небольшим запаздыванием (рис. 6).

Результаты моделирования. Сравнение межгодовых изменений уровня озера с изменениями количества осадков обнаруживает прямую, статистически значимую связь, что вполне естественно (рис. 7). Но она обеспечивает лишь 46 % дисперсии значений уровня (наивысший коэффициент детерминации $R^2 = 0,462$ получен для связи изменений уровня с осадками в летне-осенний сезон), что указывает на то, что эта компонента водного баланса является хотя и главной, но недостаточной для понимания и прогнозирования изменений уровня. Для оценки вклада обеих основных компонент водного баланса (притока и стока) системы уравнений (2) решены для нескольких 4-летних периодов. Полученные значения коэффициентов a , b , c и $(p - V_c)$

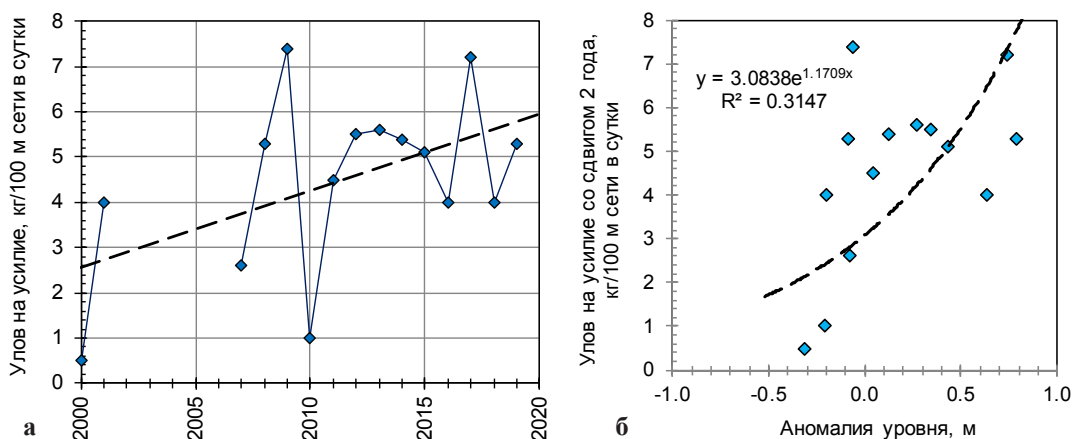


Рис. 6. Межгодовая динамика среднегодовых уловов на усилие в оз. Ханка для ставных сетей с ячейей 50–80 мм (а, пунктиром показан линейный тренд за период 2000–2019 гг.) и график связи среднегодовых уловов на усилие со среднегодовыми аномалиями уровня озера со сдвигом 2 года (б, пунктиром показан экспоненциальный тренд)

Fig. 6. Dynamics of mean annual catch per unit effort (CPUE, kg per 100 m of standard fixed net with mesh 50–80 mm per day) in Lake Khanka (а, linear trend is shown by dotted line) and diagram of CPUE relationship with mean annual anomaly of the water level with 2 years lag (б, exponential trend is shown by dotted line)

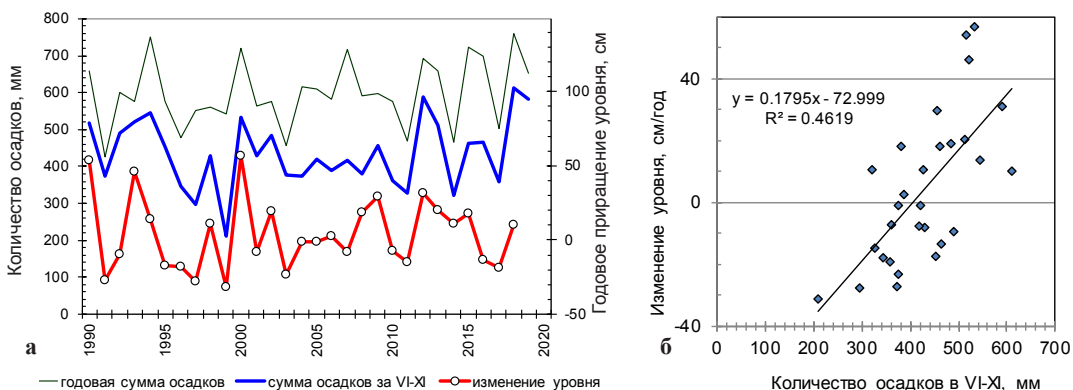


Рис. 7. Динамика годовых приращений уровня озера и количества осадков на ГМС «Астраханка» (а) и график линейной связи между изменениями уровня и осадками за июнь–ноябрь (б)

Fig. 7. Dynamics of annual increments of the Lake Khanka level and precipitation at Astrakhanka meteo station, by certain months (а) and linear relationship between the annual increments and precipitation in June–November (б)

оказались неустойчивыми (рис. 8). Точнее, они были довольно стабильны примерно до 2010 г., после чего водный баланс озера нарушился, величины коэффициентов a , b и c резко уменьшились, а величины $(p - V_e)$, наоборот, выросли и сменили знак. Этот член уравнения отражает суммарное влияние на уровень озера испарения и некоего притока, непропорционального количеству осадков. В 2000-е гг. разность $(p - V_e)$ была отрицательной, что соответствует вкладу в водный баланс испарения, а упомянутый приток, по-видимому, был несущественным. Но после 2010 г. вклад этого притока начал сильно меняться от года к году и в целом возрастал, а с 2015 г. он превышает вклад испарения, поэтому компонента $(p - V_e)$ стала положительной.

С использованием осредненных по годам значений эмпирических коэффициентов уравнения (2) рассчитаны основные компоненты водного баланса оз. Ханка. Как оказалось, примерно до 2010 г. приток воды в озеро, за вычетом испарения, довольно строго зависел от количества осадков в летне-осенний сезон ($R^2 = 0,831$), но в текущем

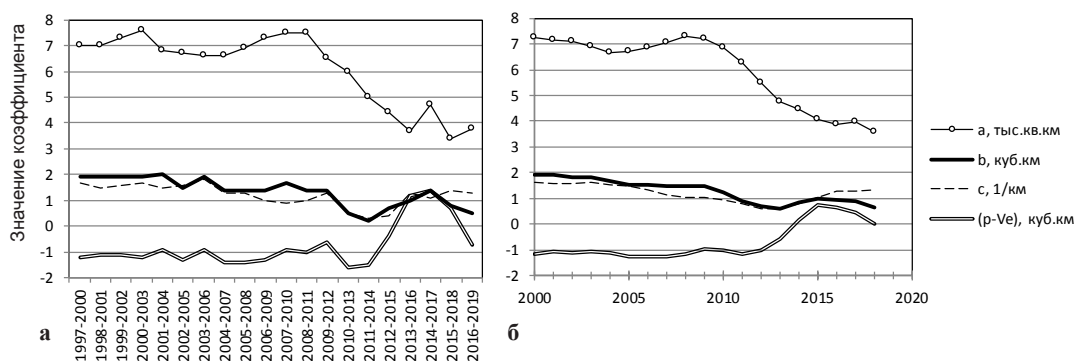


Рис. 8. Оценки эмпирических коэффициентов уравнения (2) по 4-летним периодам (а) и их осредненные по годам значения (б)

Fig. 8. Estimations for empirical coefficients of Equation (2), by 4-years periods (а), and their values averaged by years (б)

десятилетия эта связь нарушена: в 2012–2013 гг. в условиях большого количества осадков приток оказался меньше, чем можно было бы ожидать при таких осадках, в 2014 и 2017 гг., когда осадков было мало, приток оказался больше ожидаемого, а в 2015–2016 гг. со средним количеством осадков — примерно соответствовал ожидаемому (рис. 9). В 2018 г. с рекордно большим количеством осадков приток опять был значительно меньше, чем можно было ожидать на основании связи, характерной для 2000-х гг., хотя превысил $2 \text{ км}^3/\text{год}$, что привело к возобновлению роста уровня озера. Можно видеть, что отклонения наблюдаемых изменений притока от величин, пропорциональных количеству осадков, в период после 2012 г. способствовали сглаживанию колебаний уровня.

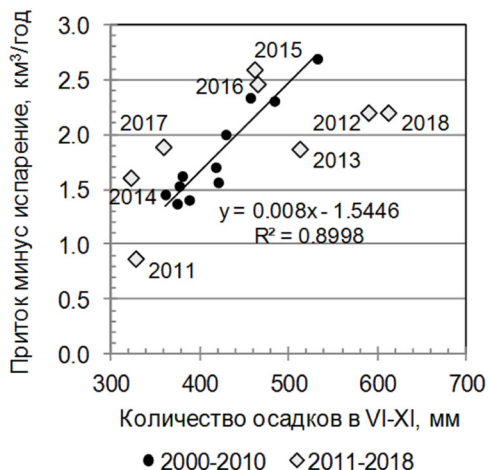


Рис. 9. Оценки годовых притоков воды в оз. Ханка по уравнению $V_p = aP + p - V_e$. Показаны график линейной регрессии и уравнение регрессии для периода до 2010 г., обозначены годы после 2010 г., в которые приток не всегда соответствовал количеству осадков

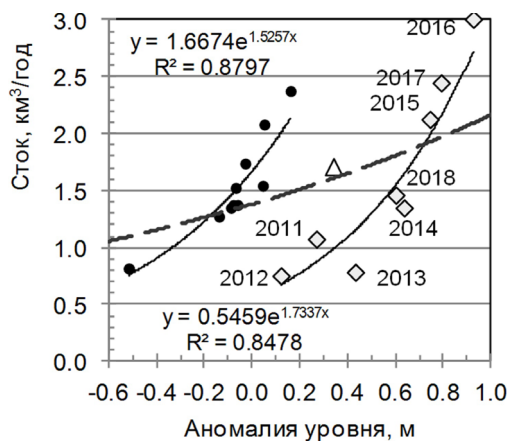
Fig. 9. Estimations of annual water income to Lake Khanka, as $V_p = aP + p - V_e$. Linear regression and its equation are shown for the period before 2010, in the marked years after 2010 the water income does not correspond with precipitation

Сток воды из озера находился в тесной связи с его уровнем как до, так и после 2010 г., но после нарушения режима кривая зависимости стока от уровня сместилась вправо (рис. 10). К примеру, при уровне озера, близком к среднемуголетнему, сток стал более чем на $1 \text{ км}^3/\text{год}$ меньше. Однако, поскольку уровень озера в последнем десятилетии выше, чем в предыдущем, сток в среднем вырос и обе зависимости (для 2000–2009 и 2011–2018 гг.) находятся вблизи кривой среднегоголетней зависимости стока от уровня, ранее определенной ДальНИИГиМ и ПУГМС [Бортин, Горчаков, 2016].

Таким образом, с помощью балансового моделирования выявлено нарушение естественного водного режима оз. Ханка, произошедшее примерно в 2011 г., причем был нарушен режим притока воды, после чего зависимость поступления воды в озеро от осадков ослабла. Это подтверждает предположение Н.Н. Бортина, А.М. Горчакова

Рис. 10. Оценки годовых стоков воды из оз. Ханка по уравнению $V_d = be^{cH}$. Показаны графики регрессии и уравнения регрессии для периода до и после 2010 г., обозначены годы после 2010 г. Пунктиром показана среднемноголетняя зависимость стока от уровня $V_d = 0,3344e^{0,0045H}$, определенная ранее по данным ДальНИИГиМ и ПУГМС [Бортин, Горчаков, 2016]

Fig. 10. Estimations of annual water discharge from Lake Khanka, as $V_d = be^{cH}$. Regression lines and equations are shown for the periods before and after 2010, the years after 2010 are marked. Dotted line — the discharge dependence on the water level determined on historical data [from Bortin, Gorchakov, 2016]



[2016] о зарегулировании притока воды в озеро со стороны КНР со сбросом в него части стока р. Мулинхэ. Однако количественные оценки влияния регулирования водосброса на водный баланс указывают на то, что эти мероприятия скорее уменьшили межгодовые вариации притока воды в озеро, обусловленные неравномерным выпадением осадков, чем просто увеличили приток, и сами по себе они не могут быть причиной экстремального роста уровня озера.

Экстремальному росту уровня оз. Ханка в 2012–2016 гг. сопутствовало нарушение наблюдавшейся до того зависимости стока из озера от его уровня: при подъеме уровня озера выше средних отметок сток стал увеличиваться не так быстро, как это наблюдалось в первом десятилетии XXI века, когда уровень был близким к среднему. Однако установившиеся в результате величины стока вполне соответствуют определенным ранее величинам стока при высоких уровнях озера. Вероятно, для каждого режима уровня существует своя зависимость стока от уровня озера, довольно тесная, а для всего диапазона изменений уровня эта зависимость менее тесная, и ее график имеет меньший наклон. Н.Н. Бортин и А.М. Горчаков [2016] указывают, что стоку из оз. Ханка может препятствовать подпор воды в р. Сунгача при большой водности р. Уссури, куда она впадает. Естественно ожидать, что это явление характерно как раз для лет с большим количеством осадков, когда водность рек возрастает, т.е. нарушение зависимости стока из озера от его уровня вследствие подпора — это дополнительный механизм экстремального роста уровня озера в годы с обильными осадками, но оно также не может быть причиной такого роста.

Следовательно, исследовав изменения водного баланса озера в последние десятилетия, приходим к тривиальному выводу, что первопричиной экстремального роста уровня в 2012–2016 гг. было аномально большое количество осадков в теплый период года, а конкретно — увеличение частоты дождливых лет. Годы, когда в теплый сезон в районе оз. Ханка выпадало свыше 450 мм осадков, и даже свыше 500 мм, неоднократно случались и раньше, но это были отдельные годы, и в промежутках между ними озеро успевало разгрузиться от избытка воды. После дождливого лета 2009 г. среднегодовой уровень вырос на 0,3 м, до повышенных относительно нормы значений, и в последующие годы со средним количеством осадков уровень озера начал снижаться, однако, не дойдя до отметок нулевых аномалий, он вновь начал быстро подниматься дождливым летом 2012 г. (589 мм осадков на метеостанции «Астраханка» за июнь–ноябрь), за которым последовало дождливое лето 2013 г. (512 мм). Этого оказалось достаточно для того, чтобы водный баланс озера при уровне, едва превышающем среднемноголетний, перешел в режим, более свойственный высокому уровню. В 2012 г. сток воды из озера оказался на 1,5 км³ меньше, чем в 2003 г., с примерно таким же среднегодовым уровнем, но количеством осадков ниже среднего, т.е. проявился эффект подпора стока. В новом

режиме продолжение роста уровня озера в 2013 г. практически не сопровождалось увеличением стока, и лишь при достижении уровнем экстремальных отметок свыше полуметра относительно нормы в последующие годы сток начал увеличиваться.

Однако в последнее десятилетие появились и признаки зарегулированности притока воды в озеро. Заметим, что они начали проявляться не с самого начала быстрого роста уровня, а лишь тогда, когда уровень озера достиг экстремально высоких отметок, и в первые годы (2012–2013) регулирование, по-видимому, имело целью остановить этот рост путем изъятия из притока до 1 км^3 воды в год. Затем, в 2014 г., когда осадков летом было мало, отмечен дополнительный приток ($p - V_e$) около $0,6 \text{ км}^3$, из-за чего снижения уровня озера не произошло, но продолжился его рост. В последующие годы величины ($p - V_e$) оставались высокими, что в годы с количеством осадков выше среднего (2015–2016) позволило уровню достичь экстремально высоких значений, а в 2017 г. с малым количеством осадков уровень озера понизился не так, как мог бы понизиться при отсутствии дополнительного притока. И лишь в 2018 г., когда наблюдалось самое большое за два десятилетия количество осадков (612 мм за июнь–ноябрь), отмечено уменьшение дополнительного притока, из-за чего уровень озера поднялся намного меньше, чем могло бы случиться при таком обилии осадков.

Балансовая модель позволяет оценить вклад предполагаемых мероприятий по регулированию притока воды в озеро в динамику его уровня. Для этого рассчитаны возможные уровни воды в озере, если бы приток воды в него не был зарегулирован и естественный водный режим сохранялся до сих пор, с использованием эмпирических коэффициентов уравнения (2) a и $(p - V_e)$, средних за 2000–2009 гг., — для всех лет и эмпирических коэффициентов b и c , средних за 2000–2009 и за 2010–2018 гг., — для соответствующих периодов низкого и высокого уровня (рис. 11). Согласно расчетам, за 2014–2015 гг. озеро получило дополнительно, сверх естественно обусловленного притока, около $1,3 \text{ км}^3$, однако в предыдущие и последующие годы приток был ниже естественного, предположительно вследствие изъятия и перенаправления части водосбора озера: в частности, за 2016–2018 гг. озеро недополучило $2,1 \text{ км}^3$ воды. Вероятно, именно меры по регулированию притока воды в озеро позволили избежать экстремального (свыше 1 м относительно нормы) повышения его уровня после дождливых лет 2013–2014 гг. и еще более резкого повышения в 2018–2019 гг. Тем не менее общее увеличение влажности климата в последнем десятилетии способствовало росту уровня озера, поэтому в 2016 г., не отличавшемся очень сильными дождями, когда режим уровня озера был близким к естественному, все же были достигнуты экстремально

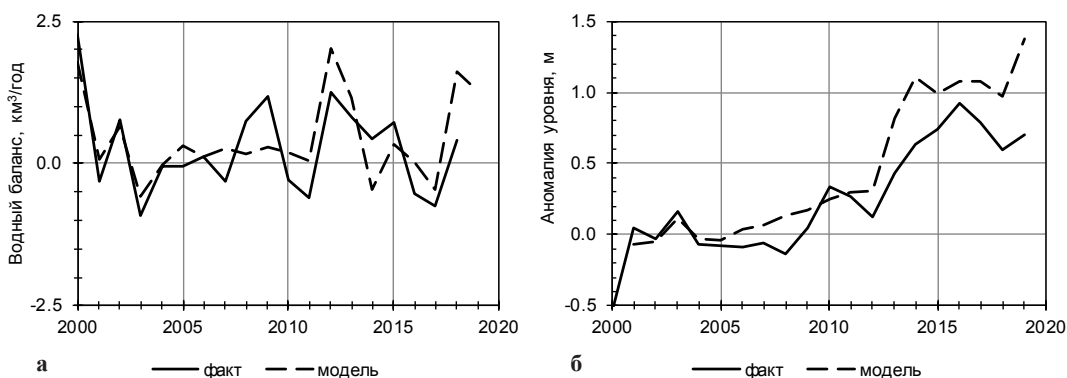


Рис. 11. Межгодовые изменения водного баланса оз. Ханка (а) и аномалий его уровня (б) по данным альтиметрических наблюдений и по результатам балансового моделирования с использованием осредненных эмпирических коэффициентов уравнения (2)

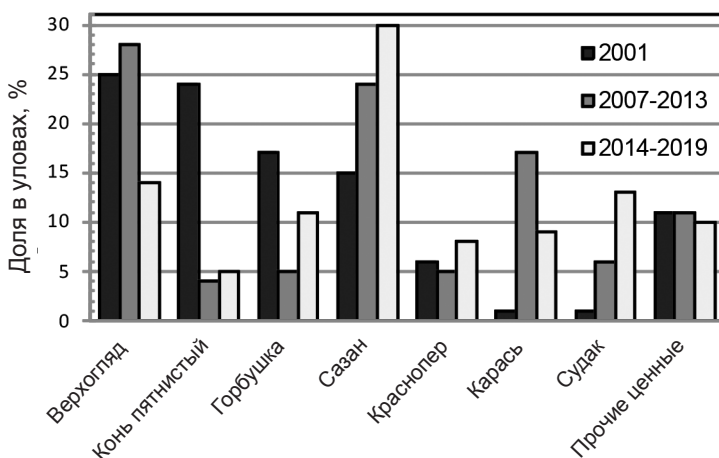
Fig. 11. Interannual changes of water balance in Lake Khanka (a) and its level anomaly (b), by altimetry observations and by results of balance modeling (Equation 2) with averaged empirical coefficients

высокие отметки уровня, с максимумом свыше 1,1 м выше среднееголетнего уровня за период альтиметрических наблюдений, при средней годовой аномалии +0,92 м.

Продолжительное пребывание озера в режиме высокой водности естественным образом положительно сказалось на состоянии его промысловых ресурсов, что проявилось в росте уловов промысловых рыб на единицу усилия. Поскольку этот показатель характеризует состояние запасов рыб, можно уверенно утверждать, что при высоком уровне воды рыбы в озере стало больше. Причем изменилось не только общее количество рыбы, но и видовая структура ихтиоцены — также в положительном для промысла смысле. В начале 2000-х гг. суммарная доля в уловах наиболее ценных для традиционного промысла видов (сазан и верхогляд) составляла около 40 %, а к 2018 г. она достигла 50 %, тогда как доля малоценных промысловых видов (горбушки и коня пятнистого) за это время снизилась с более чем 40 до 5–25 % уловов (рис. 12). При этом практически с нуля до 10–15 % уловов возросла доля судака — нового для Ханки промыслового вида.

Рис. 12. Динамика соотношения биомасс уловов промысловых видов рыб в оз. Ханка

Fig. 12. Dynamics of species composition for catches of commercial fishes in Lake Khanka



Динамика соотношения уловов рыб в оз. Ханка указывает на то, что происходящие в нем изменения уровня воды влияют на его промысловые ресурсы видоспецифично. В период роста уровня (2010-е гг.), помимо быстрого роста численности судака, увеличивались уловы сазана (в среднем от 1,1 кг/100 м сети в сутки в 2007–2008 гг. до 2,5 кг/100 м сети в сутки в 2017 г., после чего уловы несколько снизились). Напротив, уловы верхогляда имели тенденцию к снижению (в 2007–2014 гг. средний показатель был 1,0 кг/100 м сети в сутки, а в 2015–2019 гг. — в среднем лишь 0,5 кг/100 м сети в сутки). Среди других массовых промысловых видов статистически значимые тенденции повышения уловов с ростом уровня отмечены также для горбушки и краснопера, а незначительное снижение уловов — у относительно немногочисленной в озере щуки, которая недоосваивается и, возможно, недоучитывается рыбаками в связи со спецификой ее промысла. Остальные промысловые виды не показывают явно выраженной тенденции при значительной межгодовой изменчивости (рис. 13).

Виды с разной динамикой численности различаются по типу нереста: сазан является типичным фитофилом, т.е. откладывает икру на мелководных на растительный субстрат, в том числе на затопленные водой наземные растения, краснопер и горбушка — фитопелагофилы, т.е. откладывают икру также на растительный субстрат, но в широком диапазоне глубин, а верхогляд — типичный пелагофил, его икра и личинки развиваются в толще воды, обычно над песчаными косами в устьях рек. Эти видовые особенности указывают на механизм влияния изменений уровня озера на состояние популяций различных видов рыб: колебания уровня сопровождаются изменениями условий нереста и раннего развития их молоди. При росте уровня озеро подтапливает осушки и низкие берега, в результате чего площадь акваторий, благоприятных для воспроизводства видов-фитофилов, значительно увеличивается. С другой стороны,

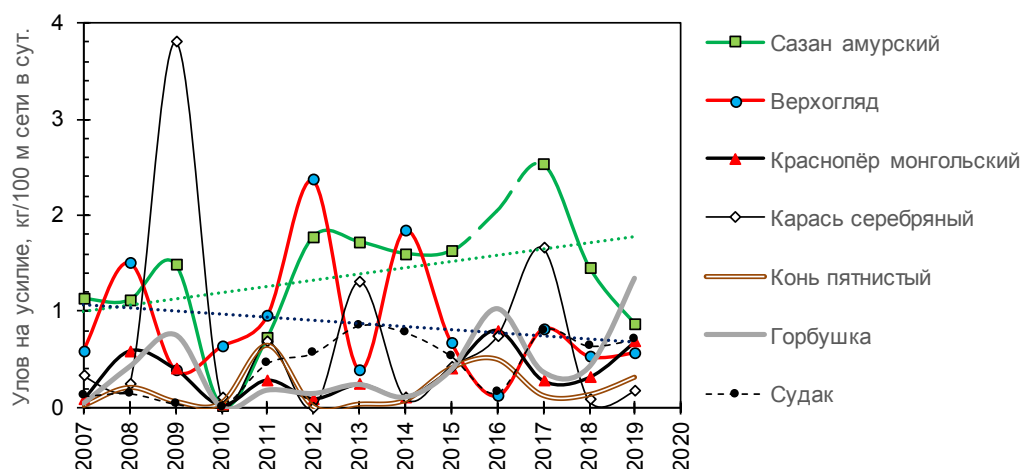


Рис. 13. Динамика среднегодовых уловов на усилие основных промысловых рыб оз. Ханка. Показаны линейные тренды уловов сазана (восходящий) и верхогляда (нисходящий) за 2007–2019 гг.

Fig. 13. Dynamics of mean annual catch per unit effort (CPUE) for the main commercial fish species in Lake Khanka. Linear trends for 2007–2019 are shown for *Cyprinus rubrofasciatus* (positive) and *Chanodichthys erythropterus* (negative)

глубина на мелководьях у устьев рек при этом растет, что, возможно, неблагоприятно для размножающихся там пелагофильных видов.

Для всех промысловых видов рыб наиболее тесные статистические связи межгодовых изменений промыслового запаса с колебаниями уровня озера не синхронны, а имеют сдвиг 2–6 лет, примерно соответствующий возрасту половозрелости (рис. 14, 15). Рост или снижение их уловов наблюдаются через несколько лет после вызвавших эти изменения колебаний уровня. Это означает, что сформировавшиеся в условиях необычно высокого уровня озера поколения пополняют промысловый запас и начинают облавливаться крупнейшими сетями через некоторое время, необходимое для достижения рыбами промысловых размеров, которое, по-видимому, соответствует выявленным сдвигам в связях.

Полученный вывод, что уровень озера тем выше, чем больше выпадает осадков в его водосборе, — тривиален [Васьковский, 1978], но выяснение этой общеизвестной закономерности не было целью работы. Цель была — определить особенности именно современного повышения уровня, с особым вниманием к возможным его неприродным факторам. Такие факторы действительно выявлены, но, как оказалось, они не были причиной катастрофического подъема уровня оз. Ханка как такового, хотя повлияли на межгодовую динамику уровня внутри периода высокой воды. В частности, достижение максимального уровня озера именно в 2016 г., который не отличался рекордным количеством осадков, как и предыдущий 2015 г., по-видимому, является следствием искусственной переброски в оз. Ханка дополнительного объема воды. Вместе с тем регулирование уровня озера помогло избежать еще больших подъемов воды после дождливых сезонов 2012 г. и особенно 2018 г., да даже в 2016 г. незарегулированный уровень был бы еще выше, согласно балансовой модели.

Зависимость состояния промысловых ресурсов озера от его уровня также выглядит естественной и отмечалась ранее [Пильщиков, 1984]. Но в условиях резкого повышения уровня удалось показать ее статистическую значимость, причем рассмотреть реакцию на изменения уровня оз. Ханка для отдельных массовых видов. В прежние годы колебания уровня озера не были столь значительными и быстрыми, к тому же исследователи не обладали достаточно длинными рядами количественных характеристик ихтиоцены, чтобы произвести статистическую оценку связей. Эта возможность появилась только

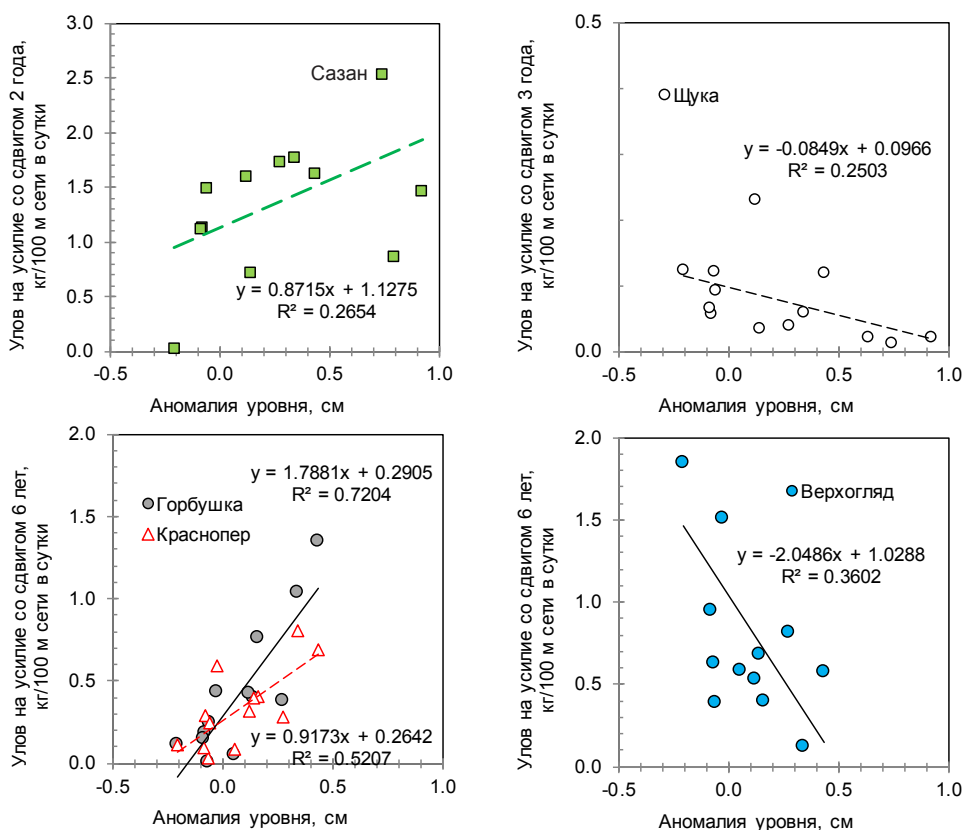


Рис. 14. Диаграммы связей среднегодовых уловов на усилие некоторых промысловых видов рыб оз. Ханка в 2007–2019 гг. со среднегодовой аномалией уровня озера в предшествующие годы. Показаны графики и уравнения линейной регрессии, даны оценки детерминации связей

Fig. 14. Diagrams of the mean annual catch per unit effort (CPUE) relationship with the water level anomaly of Lake Khanka in preceding years, by commercial fish species. Linear regressions and their equations are shown, determination of the relationships is estimated

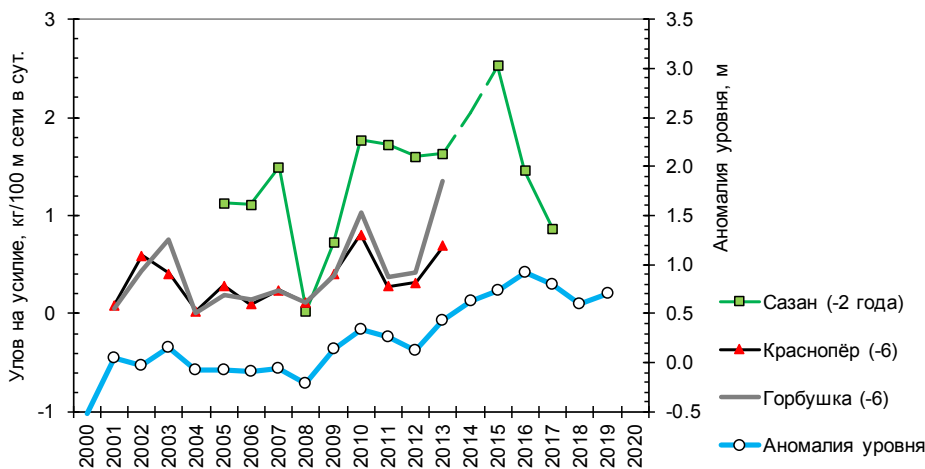


Рис. 15. Межгодовые изменения среднегодовых уловов на усилие промысловых видов рыб, увеличивающих свою численность на фоне роста уровня оз. Ханка, показанные относительно колебаний уровня озера со сдвигом 2–6 лет, обеспечивающим максимальную тесноту статистических связей (величины сдвигов для каждого вида указаны в легенде)

Fig. 15. Dynamics of mean annual catch per unit effort (CPUE) in Lake Khanka for commercial fish species with growing stocks relative to the level fluctuations; CPUE variations are shown with temporary lag providing the closest statistic relationship (lags are indicated in legend, by species)

в последние годы в результате многолетнего научного мониторинга биологических ресурсов озера, организованного ТИНРО. Как оказалось, статистические связи изменений промыслового запаса рассмотренных ценных видов рыб с колебаниями уровня оз. Ханка являются достаточно тесными ($r = 0,5-0,8$). Для некоторых промысловых видов (горбушка, монгольский краснопер) влияние колебаний уровня озера на состояние его промысловых ресурсов доминирует над всеми другими факторами, включая промысел в его современном состоянии. Неудивительно, что длительный запрет на промысел (2002–2006 гг.), введенный в период снижения уровня озера, не привел к восстановлению его ресурсов после перелома, зато в последующие годы, несмотря на постоянно увеличивающийся промысловый пресс, промысловые запасы быстро восстановились вслед за ростом уровня, а для рыб-филофилов даже достигли значений 1980-х гг., когда их запасы были стабильно высокими.

Подобная положительная связь промысловых запасов с водностью наблюдается и в бассейне р. Амур, где она интерпретируется на основе концепции В.В. Богатова [1994] об увеличении продуктивности пресноводных водоемов при увеличении их водности благодаря интенсификации круговорота биогенных элементов [Крыхтин, 1975; Семенченко, 2008]. Возможно, подобный механизм действует и на оз. Ханка тоже. Однако, судя по тому, что здесь подъем уровня вод оказался благоприятным не для всех видов рыб, а также учитывая обнаруженные сдвиги между изменениями уровня и изменениями обилия отдельных видов, представляется, что для крупного озера более актуально видоспецифическое влияние изменений уровня воды на популяции рыб через механизмы их воспроизводства, учитывающее видовые особенности нереста.

Наличие тесной зависимости промысловых запасов ценных видов рыб от уровня оз. Ханка с выявленными временными сдвигами позволяет использовать данные мониторинга уровня воды в промысловом прогнозировании. Несколько сложнее прогнозировать изменения самого уровня, коль скоро теперь они отчасти зависят от воли человека. Однако практика 2010-х гг. показывает, что регулирование уровня озера не усиливает его колебания, а скорее сглаживает, что позволяет надеяться на то, что даже в случае наступления очередного дождливого лета резкого катастрофического подъема уровня не произойдет, а, с другой стороны, высокий уровень озера, в целом благоприятный для успешной репродукции его биологических ресурсов, следовательно, и для рыбного промысла, будет по мере возможностей сохраняться.

Выводы

Основной причиной экстремального подъема уровня оз. Ханка, начавшегося в 2008 г. и достигнувшего максимума в 2016 г., является увеличение количества осадков в его водосборном бассейне, а конкретнее — более частые, чем обычно, годы с дождливым летом, когда за июнь–ноябрь выпадает > 400 мм осадков.

Подъем уровня озера усугубляется затруднением стока из него в дождливые годы, вероятно, по причине подпора воды в р. Сунгача со стороны Уссури в условиях большой водности, а также из-за засорения или обмеления ее истока или перекрытия водосбросного канала.

Начиная с 2010 г. естественный водный баланс озера искажен, возможно, вследствие мер по регулированию уровня озера; эти меры могут приводить как к дополнительному притоку воды в озеро, так и к уменьшению притока, но в целом, видимо, направлены на относительную стабилизацию его уровня.

Современный режим высокого уровня оз. Ханка благоприятствует росту его рыбных ресурсов: в течение современного периода подъема уровня запасы основных промысловых видов рыб выросли примерно вдвое.

В условиях высокого уровня оз. Ханка произошло изменение соотношения основных ресурсообразующих видов рыб в общем запасе в пользу филофилов, прежде всего сазана амурского. С другой стороны, доля в запасе рыб-пелагофилов (верхогляда) несколько снизилась. Видоспецифичность влияния роста уровня на популяции

рыб указывает на то, что оно осуществляется через механизмы их воспроизводства, с учетом видовых особенностей нереста.

Изменения запасов некоторых видов массовых промысловых рыб в оз. Ханка (сазана, краснопера, горбушки, шуки, верхогляда) имеют значимую статистическую связь с колебаниями его уровня со сдвигом 2–6 лет, что также указывает на то, что воздействие изменений уровня на популяции оказывается через их воспроизводство (сдвиг определяется возрастом вступления пополнения в промысел); асинхронность связи позволяет использовать выявленные зависимости для промыслового прогнозирования.

Благодарности

Авторы отмечают, что исследование было инспирировано дискуссией о причинах катастрофического роста уровня оз. Ханка и его последствиях, развернувшейся на 1-й Дальневосточной конференции «Трансграничное озеро Ханка: причины повышения уровня воды и экологические угрозы» в мае 2016 г. (Биолого-почвенный институт Дальневосточного отделения РАН), и благодарны ее организаторам.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках тематического плана НИР Тихоокеанского филиала Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ТИНРО).

Соблюдение этических стандартов

Все авторы работы являются сотрудниками Тихоокеанского филиала Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ТИНРО). Конфликта интересов нет.

Информация о вкладе авторов

Ю.И. Зуенко: концепция исследования, разработка модели, моделирование, анализ данных, обсуждение результатов, формулировка выводов, иллюстрации, текст, редактирование.

М.Е. Шаповалов: сбор и анализ данных, обсуждение результатов, формулировка выводов, иллюстрации, текст, редактирование.

А.С. Курносова: сбор и анализ данных, иллюстрации.

Список литературы

Богатов В.В. Экология речных сообществ российского Дальнего Востока : моногр. — Владивосток : Дальнаука, 1994. — 218 с.

Бортин Н.Н., Горчаков А.М. Причины экстремально высокого уровня воды трансграничного озера Ханка // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. — 2016. — № 4. — С. 62–84.

Васьковский М.Г. Гидрологический режим озера Ханка : моногр. — Л. : Гидрометеиздат, 1978. — 175 с.

Крыхтин М.Л. О периодических колебаниях численности жилых рыб Амура и их причинах // Вопр. ихтиол. — 1975. — Т. 15, вып. 5(94). — С. 919–922.

Пильщиков В.В. Влияние некоторых абиотических факторов на рост, численность и величину вылова рыб в оз. Ханка // Биологические ресурсы внутренних водоемов Сибири и Дальнего Востока. — М. : Наука, 1984. — С. 209–216.

Семенченко Н.Н. Гидрологический режим р. Амур и численность промысловых пресноводных рыб // Современное состояние водных биоресурсов : мат-лы науч. конф., посвящ. 70-летию С.М. Коновалова. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2008. — С. 246–250.

Шаповалов М.Е. Динамика состояния запасов рыб озера Ханка // Трансграничное озеро Ханка: причины повышения уровня воды и экологические угрозы. — Владивосток : Дальнаука, 2016. — С. 174–181.

References

- Bogatov, V.V.**, Ecology of river communities of Russian Far-East, Vladivostok: Dal'nauka, 1994.
- Bortin, N.N. and Gorchakov, A.M.**, Causes of the transboundary Lake Khanka extreme high water level, *Water sector of Russia: problems, technologies, management*, 2016, no. 4, pp. 62–84.
- Vaskovsky, M.G.**, *Gidrologicheskiy rezhim ozera Khanka* (Hydrological regime of Lake Khanka), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978.
- Krykhtin, M.L.**, On periodic fluctuations in the number of inhabited fish of the Amur River and their reasons, *Vopr. Ikhtiol.*, 1975, vol. 15, no. 5(94), pp. 919–922.
- Pilshchikov, V.V.**, The influence of some abiotic factors on the growth, number and size of fish catch in Lake Khanka, in *Biologicheskiye resursy vnutrennikh vodoyemov Sibiri i Dal'nego Vostoka* (Biological resources of inland water bodies of Siberia and the Far East), Moscow: Nauka, 1984, pp. 209–216.
- Semenchenko, N.N.**, The hydrological regime of the Amur river and the number of commercial freshwater fish, in *Mater. nauchn. konf., posvyashch. 70-letiyu S.M. Konovalova "Sovremennoe sostoyanie vodnykh bioresursov"* (Proc. Sci. Conf. 70th anniversary of S.M. Konovalova "Current state of aquatic biological resources"), Vladivostok: TINRO-tsentr, 2008, pp. 246–250.
- Shapovalov, M.E.**, Dynamics of the state of fish stocks in Lake Khanka, in *Transgranichnoye ozero Khanka: prichiny povysheniya urovnya vody i ekologicheskiye ugrozy* (Transboundary Lake Khanka: causes of rising water levels and environmental threats), Vladivostok: Dal'nauka, 2016, pp. 174–181.

Поступила в редакцию 2.11.2020 г.

После доработки 1.12.2020 г.

Принята к публикации 3.12.2020 г.