

*И.В. Герасимова, В.С. Валиев, Д.В. Иванов**Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, podrost@mail.ru*

ПОДХОДЫ К РАСЧЕТАМ ИНЕРЦИОННОСТИ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА РЕКИ

Оценка инерционности эколого-гидрологических систем чрезвычайно важна для эффективного управления водохозяйственным комплексом речных бассейнов и для прогнозирования экологической ситуации в целом. Показано, что время и амплитуда изменчивости параметров системы зависят не только от интенсивности воздействия, но и от скорости протекания обеспечивающих изменчивость реакций. Отмечается, что для оценки инерционности эколого-гидрологических систем оптимально использование пула гидрохимических показателей. На примере расчета изменчивости удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ) продемонстрирован алгоритм оценки инерционности эколого-гидрологической системы бассейна реки.

Ключевые слова: эколого-гидрологические системы; качество вод; загрязнение; устойчивость; индекс инерционности.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2024.1.45.49>

Введение

Важнейшим свойством природных систем, к которым относятся эколого-гидрологические системы водосборов рек, является инерционность. Инерционность динамической системы можно представить в виде «условия предыдущего состояния» (previous state condition), кондиций достаточности, удерживающих состояние системы от изменения (Ponzini, Steinman, 2020; Lopez-Miranda et al., 2010). На уровне отдельных параметров системы инерционность определяется скоростью трансформации, миграции, седиментации, аккумуляции вещества и энергии. Иначе говоря, воздействию для изменения текущего состояния параметра необходимо время, а амплитуда изменчивости параметра зависит не только от интенсивности воздействия, но и от скорости протекания обеспечивающих изменчивость реакций (Khalighi et al., 2022).

Проблема измерения и моделирования инерционности сложных систем заключается в огромном многообразии показателей, характеризующих состояние этих систем и соответствующей этому многообразию сложной динамике. Тем не менее, исследователи подчеркивают возможность эффективного моделирования инерционности как отдельных процессов, так и систем в целом (Guerra et al., 2022). В частности, отмечается необходимость раскрытия функциональных характеристик, отражающих основной вектор развития системы во времени. Так, при оценке инерцион-

ности популяций предлагается рассматривать динамику численности популяций, их видового разнообразия и плотности (Guiver et al., 2015; Delgado et al., 2010), то есть функциональных характеристик, которые отражают устойчивость всей системы (Koons et al., 2007).

В этом контексте для оценки инерционности эколого-гидрологических систем оптимально использование пула гидрохимических показателей, многие из которых, к тому же, являются показателями загрязнения. Их изменчивость будет отражать как уровень воздействия, так и устойчивость рассматриваемой системы.

Так как между воздействием на систему и ее откликом проходит какое-то время то, даже зная уровень воздействия, мы не можем однозначно определить ни момент отклика, ни его интенсивность. Поэтому оценку инерционности предпочтительно выражать в вероятностных категориях.

Например, обозначим функционирование системы в виде меняющейся во времени функции $f_i(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$, где X_n – совокупность параметров, отражающих устойчивость системы. Через некоторый временной период t функция изменится на $\Delta f = f_{i2}(X_n) - f_{i1}(X_n)$, однако информация о том, как сильно изменятся характеристики параметров системы, через какое время и изменятся ли, остается для наблюдателя неопределенной (Чернов, 2009).

Между тем, при оценке временных рядов общей мерой проявления неких событий (n) является их частота (λ) за определенный промежуток

времени (t):

$$\lambda = \frac{n}{t}$$

При этом можно решать и обратную задачу, если оценивать интервалы времени между проявлениями события в условиях фиксированной его частоты λ , что хорошо описывается распределением Пуассона

$$\phi(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$$

Таким образом, формула вероятности наступления события за интервал времени t определяется экспоненциальным отношением:

$$P_p = \int_0^t \phi(t) dt = \lambda \int_0^t \exp(-\lambda t) dt = 1 - \exp(-\lambda t).$$

Так как на параметры системы воздействует множество факторов, а общий выход системы определяется вектором значений функций вида $f_i(X_n)$, то в качестве события удобнее принять степень отклонения параметра X_n от его центра распределения, которое произошло за время t . В этом случае оценивается не собственно вероятность, а относительное значение, отражающее устойчивость данного параметра во времени:

$$g(X) = \exp\left(-\frac{(X' - X_t)^2}{\sigma^2}\right),$$

где X' – математическое ожидание значений параметра X за весь временной ряд; X_t – значение параметра X за время t , σ – среднеквадратическое отклонение всего ряда.

В том случае, если мы оцениваем совокупность нескольких периодов или параметров, инерционность можно выразить в виде средневзвешенного значения:

$$M_I = \frac{\sum_n^i g(X_i)}{n},$$

где i – показатель (период), n – число показателей (периодов).

Таким образом, оценку инерционности удобно определять с помощью характеристик изменчивости всей совокупности параметров системы, так как эти характеристики фиксируют вектор общей изменчивости (Bosse et al., 2009; Мусаев, 2014).

Оценка инерционности эколого-гидрологической системы чрезвычайно важна не только для эффективного управления водохозяйственным комплексом речного бассейна, но и для прогнозирования экологической

ситуации в целом. В связи с тем, что доступными параметрами, характеризующими состояние таких систем, являются данные гидрохимического мониторинга, нами было проведено исследование, целью которого явилась оценка инерционности гидрохимического режима в устье малой реки.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных материалов для проведения исследования был использован corteж гидрохимических данных по 690 пробам поверхностных вод р. Казанка (Республика Татарстан) за период с 2014 по 2021 гг., которые были получены в рамках государственного мониторинга Министерства экологии и природных ресурсов РТ, а также по результатам собственных наблюдений.

В качестве оцениваемого параметра использовались значения удельного комбинаторного индекса загрязненности вод (УКИЗВ), рассчитываемого в соответствии с РД 52.24.643–2002.

Для расчета УКИЗВ использовались 15 показателей из перечня №1 Приложения В к РД 52.24.643–2002 (аммоний ион, БПК₅, железо общее, растворенный кислород, марганец, медь, нефтепродукты, никель, нитраты, нитриты, сульфаты, фенол, хлориды, ХПК, цинк, а в качестве порогов – рыбохозяйственные и гигиенические ПДК).

С целью апробации предлагаемого подхода расчет комбинаторных индексов осуществлялся как с учетом, так и без учета критических показателей загрязненности (КПЗ), а для расчета инерционности использовалось их среднее значение (X_t).

Так как использовался только один параметр (УКИЗВ), инерционность (I) оценивали по формуле:

$$I = \exp\left(-\frac{(X' - X_t)^2}{\sigma^2}\right)$$

где X' – медиана значений УКИЗВ за все годы исследования; X_t – значение УКИЗВ за год t , σ – среднеквадратическое отклонение значений УКИЗВ.

Коэффициент I представляет устойчивость системы, формируемой уровнем ее инерционности, соответствующей оцениваемому периоду, и отражает способность системы к адаптации. Возрастание значений коэффициента, сопровождающее усиление воздействия, свидетельствует об устойчивой динамике состояния системы. Если же высокое воздействие (загрязнение) сопровождается снижением коэффициента, то это указывает на

Таблица. Значения УКИЗВ и расчетные параметры инерционности (I), используемые для оценки ее характеристик

Table. Values of specific combinatorial pollution index (SCPI) and calculated parameters of inertia (I) used for estimation of its characteristics

Годы Years	УКИЗВ без учета КПЗ SCPI without CPI* accounting	УКИЗВ с учетом КПЗ SCPI with CPI* accounting	X_t	I
2014	5.1	6.7	5.9	0.238
2015	3.9	4.2	4.1	0.201
2016	4.3	5.6	4.9	0.990
2017	5.0	6.0	5.5	0.655
2018	4.9	5.9	5.4	0.768
2019	4.6	5.5	5.1	0.990
2020	3.6	3.9	3.8	0.060
2021	4.0	4.8	4.4	0.480
X'			5.0	
σ			0.7	

*CPI – critical pollution indicator

исчерпание инерционных ресурсов системы и ослабление ее потенциала.

Результаты и их обсуждение

Результаты расчетов представлены в таблице.

Они показывают, что качество вод в р. Казанка по величине удельного комбинаторного индекса загрязненности изменяется по годам наблюдений от «очень загрязненной» 3б класса до «грязной» 4б класса, в среднем демонстрируя качество воды на уровне 4а класса «грязная».

Общая динамика изменчивости значений УКИЗВ за период с 2014 по 2021 гг. имеет слабую тенденцию к снижению, в основном за счет уменьшения вклада таких показателей как фенолы, нефтепродукты и ион аммония.

Вместе с тем, значения коэффициента инерционности I указывают на то, что в целом за рассматриваемый временной интервал эколого-гидрологическая система р. Казанка показала достаточную устойчивость к воздействию, о чем свиде-

тельствует синхронность изменчивости (корреляция) между значениями УКИЗВ и индекса I , за исключением 2017 и 2018 гг. (рис.). В этот период устойчивость эколого-гидрологической системы реки была недостаточной для того, чтобы компенсировать оказываемое на нее воздействие.

Несмотря на то, что общая динамика значений УКИЗВ свидетельствует о наметившейся тенденции к улучшению гидрохимической ситуации, учет инерционности системы позволяет оценить ее устойчивость, характеризующую ресурсный потенциал водного объекта. Сочетание при оценке состояния системы двух показателей – воздействия и устойчивости – позволяет более эффективно регулировать управляющие воздействия на уровне водохозяйственных комплексов, обеспечивая рациональное природопользование.

Заключение

В результате проведенного исследования апробирован способ оценки инерционности гидрохимического режима р. Казанка как ключевого элемента эколого-гидрологической системы ее бассейна. Установлен факт значительной загрязненности водного объекта, среднемноголетнее качество воды в котором соответствует 4а классу «грязная».

Анализ динамики изменчивости значений УКИЗВ за период с 2014 по 2021 гг. позволил рассчитать коэффициенты инерционности, которые отражают устойчивость системы, формируемой уровнем инерционности соответствующего периода. Их значения указывают на то, что в целом за рассмотренный период гидрохимический режим р. Казанка демонстрирует достаточную устойчи-

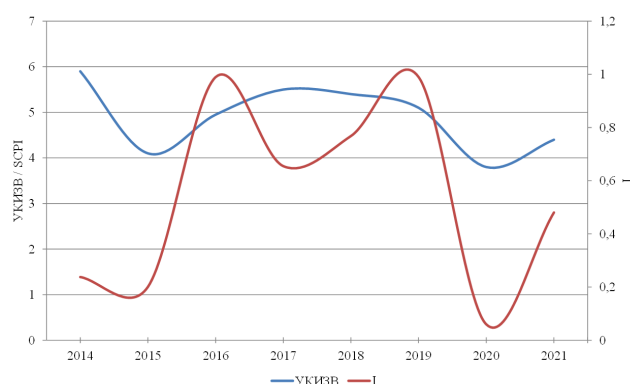


Рис. Динамика УКИЗВ и индекса инерционности I
Fig. Dynamics of specific combinatorial pollution index (SCPI) and inertia index I

вость, о чем свидетельствует корреляция между значениями УКИЗВ и индекса инерционности, за исключением 2017 и 2018 гг., когда было отмечено снижение качества вод.

Апробация подхода позволила интерпретировать динамику УКИЗВ с позиций инерционности гидрохимического режима, а также оценить устойчивость бассейна малой реки, обеспечивающую ее ресурсный потенциал.

Список литературы

1. Мусаев А.А. Статистический анализ инерционности хаотических процессов // Труды СПИИ РАН. 2014. Вып. 2. С. 48–59.
2. РД 52.24.643–2002. Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям.
3. Чернов А.В. Методы линеаризации и модели контролируемых нелинейных дискретных динамических систем // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2009. №2. С. 156–162.
4. Bosse T., Treur J., Jonker C.M. Formal analysis of design process dynamics // AI EDAM. 2010. Vol. 24, №3. P. 397–423.
5. Delgado M., Ratikainen I.I., Kokko H. Inertia: the discrepancy between individual and common good in dispersal and prospecting behaviour // Biological reviews of the Cambridge philosophical society. 2011. Vol. 86, iss. 3. P. 717–732. doi: 10.1111/j.1469-185X.2010.00167.x.
6. Guerra K., Haro P., Gutiérrez R.E., Gómez-Barea A. Data for the modelling of the future power system with a high share of variable renewable energy // Data brief. 2022. Vol. 42. 108095. doi: 10.1016/j.dib.2022.108095.
7. Guiver C., Dreiwil H., Filannino D.-M., Hodgson D., Lloyd S., Townley S. The role of population inertia in predicting the outcome of stage-structured biological invasions // Mathematical biosciences. 2015. Vol. 265. P. 1–11. doi: 10.1016/j.mbs.2015.04.005.
8. Khalighi M., Sommeria-Klein G., Gonze D., Faust K., Lahti L. Quantifying the impact of ecological memory on the dynamics of interacting communities // PLoS. Computational biology. 2022. Vol. 18, iss. 6. e1009396. doi: 10.1371/journal.pcbi.1009396.
9. Koons D.N., Holmes R.R., Grand J.B. Population inertia and its sensitivity to changes in vital rates and population structure // Ecology. 2007. Vol. 88, iss. 11. P. 2857–2867. doi: 10.1890/06-1801.1.
10. Lopez-Miranda J., Marin C. Dietary, physiological, and genetic impacts on postprandial lipid metabolism // British journal of nutrition. 2007. Vol. 98, iss. 3. P. 458–473. doi: 10.1017/S000711450774268X.
11. Ponzini G.T., Steinman S.A. Mnemonic discrimination and social anxiety: the role of state anxiety // Cognition and emotion. 2020. Vol. 34, iss. 8. P. 1549–1560. doi: 10.1080/02699931.2020.1779039.

References

1. Musaev A.A. Statisticheskij analiz inercionnosti haoticheskikh processov [Statistical analysis of the inertia of chaotic processes] // Proceedings of SPII RAS. 2014. Vol. 2. P. 48–59.
2. RD 52.24.643–2002. Metodicheskie ukazaniya. Metod kompleksnoj ocenki stepeni zagryaznennosti poverhnostnykh vod po gidrohimicheskim pokazatelyam [Methodical instructions. Method for a comprehensive assessment of the degree of pollu-

tion of surface waters based on hydrochemical indicators].

3. Chernov A.V. Metody linearizacii i modeli kontroliruemyyh nelinejnyh diskretnykh dinamicheskikh sistem [Linearization methods and models of controlled nonlinear discrete dynamic systems] // Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta [Scientific and technical journal of the St. Petersburg state polytechnic university]. 2009. No 2. P. 156–162.

4. Bosse T., Treur J., Jonker C.M. Formal analysis of design process dynamics // AI EDAM. 2010. Vol. 24, No 3. P. 397–423.

5. Delgado M., Ratikainen I.I., Kokko H. Inertia: the discrepancy between individual and common good in dispersal and prospecting behaviour // Biological reviews of the Cambridge philosophical society. 2011. Vol. 86, iss. 3. P. 717–732. doi: 10.1111/j.1469-185X.2010.00167.x.

6. Guerra K., Haro P., Gutiérrez R.E., Gómez-Barea A. Data for the modelling of the future power system with a high share of variable renewable energy // Data brief. 2022. Vol. 42. 108095. doi: 10.1016/j.dib.2022.108095.

7. Guiver C., Dreiwil H., Filannino D.-M., Hodgson D., Lloyd S., Townley S. The role of population inertia in predicting the outcome of stage-structured biological invasions // Mathematical biosciences. 2015. Vol. 265. P. 1–11. doi: 10.1016/j.mbs.2015.04.005.

8. Khalighi M., Sommeria-Klein G., Gonze D., Faust K., Lahti L. Quantifying the impact of ecological memory on the dynamics of interacting communities // PLoS. Computational biology. 2022. Vol. 18, iss. 6. e1009396. doi: 10.1371/journal.pcbi.1009396.

9. Koons D.N., Holmes R.R., Grand J.B. Population inertia and its sensitivity to changes in vital rates and population structure // Ecology. 2007. Vol. 88, iss. 11. P. 2857–2867. doi: 10.1890/06-1801.1.

10. Lopez-Miranda J., Marin C. Dietary, physiological, and genetic impacts on postprandial lipid metabolism // British journal of nutrition. 2007. Vol. 98, iss. 3. P. 458–473. doi: 10.1017/S000711450774268X.

11. Ponzini G.T., Steinman S.A. Mnemonic discrimination and social anxiety: the role of state anxiety // Cognition and emotion. 2020. Vol. 34, iss. 8. P. 1549–1560. doi: 10.1080/02699931.2020.1779039.

Gerasimova I.V., Valiev V.S., Ivanov D.V. Approaches to calculations of inertia in a river hydrochemical regime.

Assessing the inertia of the ecological-hydrological system is extremely important for the effective management of the water management complex of the basin and for predicting the environmental situation as a whole as well. It was shown that the time and amplitude of system parameters variation depended as on the intensity of the impact and on the rate of occurrence of the reactions that provided variability as well. For the estimation of inertia in ecological and hydrological systems, it was optimal to use a pool of hydrochemical indicators. In the case of calculating the variation of the specific combinatorial pollution index, an algorithm for assessing the inertia of the ecological-hydrological system of the river basin was demonstrated.

Keywords: ecological-hydrological systems; water quality; pollution; sustainability; inertia index.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 22.01.2024

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 31.01.2024

Принята к публикации / Accepted for publication: 06.02.2024

Сведения об авторах

Герасимова Ирина Викторовна, соискатель, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: gerasimova.irina23@mail.ru.

Валиев Всеволод Сергеевич, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: podrost@mail.ru.

Иванов Дмитрий Владимирович, доктор географических наук, зам. директора по научной работе, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: water-rf@mail.ru.

Information about the authors

Irina V. Gerasimova, Applicant, Researcher Institute for Problem of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daurkaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: gerasimova.irina23@mail.ru.

Vsevolod S. Valiev, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daurkaya st., Kazan, Russia, 420087, E-mail: podrost@mail.ru.

Dmitrii V. Ivanov, D.Sci. in Geography, Deputy Director, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daurkaya st., Kazan, Russia, 420087, E-mail: water-rf@mail.ru.

