



ЭКОЛОГИЯ ECOLOGY

DOI 10.22363/2313-2310-2022-30-2-107-115

УДК 556.5(07)

Научная статья / Research article

Процессы самоочищения природных вод и их лабораторная модель

К.Г. Кондрашин *Астраханский архитектурно-строительный университет,
Астрахань, Россия*✉ astrakhan_kirill@mail.ru

Аннотация. Рассмотрен механизм самоочищения природных вод. Показано, что лабораторное моделирование возможно проводить на основе полученного коэффициента скорости самоочищения воды K от загрязняющих веществ. Исследована зависимость содержания фенола от физических факторов отобранной пробы. Проведен расчет коэффициента скорости самоочищения речной воды от загрязняющего вещества. Физико-химический состав поверхностных вод напрямую зависит от гидрологического режима реки, а значит, модель процессов самоочищения может быть применена при определенных параметрах исследуемых рек. С использованием модели, полученной в ходе проведения данных работ, можно проводить различные исследования зависимости физико-химического состава воды от различных гидрологических параметров. Основой данного исследования послужили работы советских ученых в области математического моделирования физико-химических процессов естественной среды поверхностных вод.

Ключевые слова: модель, самоочищение, фенолы, коэффициент скорости самоочищения K

Благодарности и финансирование. Автор благодарит коллектив Астраханского государственного архитектурно-строительного университета за предоставленную площадку для проведения исследования, а также Научно-исследовательскую лабораторию приоритетных исследований региона.

История статьи: поступила в редакцию 25.12.2021; принята к публикации 23.02.2022.

Для цитирования: Кондрашин К.Г. Процессы самоочищения природных вод и их лабораторная модель // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2022. Т. 30. № 2. С. 107—115. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-2-107-115>

© Кондрашин К.Г., 2022



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0
International License <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/1>

Self-purification processes of natural water and their laboratory model

Kirill G. Kondrashin 

*Astrakhan University of Architecture and Civil Engineering,
Astrakhan, Russia*

✉ astrakhan_kirill@mail.ru

Abstract. In this work, the processes of self-purification of natural water masses have been studied, and the possibility of laboratory modeling based on the obtained coefficient of the rate of self-purification of water K from pollutants has been investigated. The correlation between the phenol content and the physical factors of the selected sample was investigated. The calculation of the rate coefficient of self-purification of river water from a contaminant is carried out. The physico-chemical composition of surface waters directly depends on the hydrological regime of the river, which means that the model of self-purification processes can be applied under certain parameters of the studied rivers. On the model obtained during these works, various studies of the correlation of the physico-chemical composition of water from various hydrological parameters can be carried out. The basis of this study was the work of Soviet scientists in the field of mathematical modeling of physico-chemical processes in the natural environment of surface waters.

Keywords: model, self-purification, phenols, coefficient of self-purification rate K .

Acknowledgements and Funding. The author thanks the staff of the Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering for providing a platform for conducting research, as well as the Research Laboratory of Priority Research in the region.

Article history: received 25.12.2021; accepted 23.02.2022.

For citation: Kondrashin KG. Self-purification processes of natural water and their laboratory model. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2022;30(2):107—115. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-1-107-115>

Введение

Уменьшение концентрации загрязняющих веществ, попадающих в водные объекты, происходит под действием ряда естественных физических, химических и биологических процессов, приводящих либо к полному удалению загрязняющих веществ (например, окислительные процессы), либо к перераспределению их в водном объекте между его составляющими (взвешенные вещества, донные отложения, водные организмы и т. д.). Для рационального использования и охраны природных вод от загрязнения большое значение имеет количественная оценка этих процессов [1, 2]. Достаточно успешно можно оценить влияние гидродинамических процессов [3—5], другие процессы требуют дальнейшего изучения.

В настоящее время большое внимание уделяется изучению процессов самоочищения природных вод от органических загрязняющих веществ. Многочисленными исследованиями установлено, что самоочищение происходит главным

образом за счет биохимического окисления и характеризуется так называемыми коэффициентами скорости самоочищения воды от загрязняющих веществ K .

Существует несколько взаимно дополняющих друг друга подходов к получению коэффициента K :

- лабораторное моделирование (стеклянные сосуды, аквариумы, циркуляционные лотки);
- натурное моделирование на водном объекте (микрокосмы, мезокосмы, изолированные или полуизолированные участки водных объектов);
- непосредственное определение убыли концентрации вещества в естественных условиях на заданном участке водного объекта.

Последний подход является наиболее точным, учитывающим весь комплекс природных условий исследуемого участка водного объекта, но и самым сложным и дорогим. Получение K в лабораторных условиях является наиболее простым, дешевым, но пока еще приближенным методом.

К сожалению, до сих пор не разработана общепринятая методология и общие методы исследования и моделирования процессов самоочищения в лабораторных условиях, что привело к появлению в литературе большого, но противоречивого материала по значениям K , полученным в разных, часто несопоставимых условиях. Даже для одного и того же вещества значения K , полученные разными авторами, отличаются в отдельных случаях на несколько порядков. Такие расхождения поставили под сомнение возможность переносить результаты лабораторных экспериментов на природные объекты [6].

Однако, несмотря на сложность, а в некоторых случаях и практическую невозможность проведения работ на водных объектах, полностью отказываться от лабораторного моделирования нецелесообразно. Кроме того, данный подход можно использовать в качестве предварительного для последующих экспериментов с применением натурного моделирования или натуральных исследований процессов самоочищения воды водного объекта.

Следовательно, для получения сопоставимых результатов требуется соблюдение некоторых общих условий проведения эксперимента.

Цель исследования — уточнить некоторые аспекты лабораторного моделирования и предложения по его проведению на основе литературных данных и проведенных исследований.

Поскольку одновременное соблюдение адекватных условий в природе и в лабораторной модели невозможно, цель эксперимента должна заключаться в получении значений коэффициента K в наиболее «жестких» условиях — для стоячих водоемов и только в водной массе. Несмотря на условность эксперимента, такой подход позволяет во многих случаях создать некоторый запас надежности при перенесении полученных данных на естественные условия водного объекта.

Материалы и методы

При проведении эксперимента важно учитывать, что изменение объема воды в процессе отбора проб может повлиять на скорость протекания биохимических процессов.

С целью уточнения этой стороны моделирования проведены эксперименты по изучению скорости самоочищения от загрязняющего вещества в разных объемах воды.

Можно предположить, что для веществ, биохимически легко окисляемых (до 2—3 сут.), целесообразно проводить определение значений K в лабораторных условиях, так как за этот срок в сосудах не успевает сформироваться аквариумный биоценоз и трансформация вещества осуществляется микроорганизмами, характерными для изучаемого водного объекта. Исходя из этого в качестве изучаемого вещества был взят фенол.

Отметим, что во всех экспериментах биогенные элементы не были фактором, лимитирующим скорость процесса самоочищения.

Для эксперимента в свежееотобранную воду р. Ахтубы (Астраханская обл.), помещенную в одну емкость, добавлялся фенол в концентрации примерно $0,5 \text{ мг/дм}^3$, вода тщательно перемешивалась и разливалась по широкогорлым сосудам емкостью 5 и 20 л. Опыт проводился в трех повторениях. Сосуды экспонировались при естественном освещении при температуре $13\text{--}15 \text{ }^\circ\text{C}$. Предварительные эксперименты показали, что время адаптации микроорганизмов к такой концентрации фенола составляло около 1 сут. Поэтому первый отбор проб воды для анализа проводился через 20 ч после начала эксперимента, а затем через каждые 4 ч по 0,5 л воды до полного исчезновения фенола (табл. 1).

Деградация основной массы фенола ($\sim 0,4 \text{ мг/дм}^3$) происходила за 8—12 ч. В сосудах большего объема скорость самоочищения была выше. Эксперимент показал, что уменьшение объема воды в сосуде в результате отбора проб для анализа вызывает изменение условий эксперимента и приводит к дополнительным погрешностям при установлении значений K , причем тем большим, чем меньше начальный объем воды (табл. 1).

Таблица 1

Влияние изменения объема воды при отборе проб на скорость самоочищения от фенола воды р. Ахтуба (февраль 2020 г.)

Объем воды, л	Концентрация фенола, мг/дм ³	Периодичность отбора проб воды, ч	Температура воды, °С	Продолжительность эксперимента, ч	Объем воды в конце эксперимента, % от начального объема	K_{20}/K_5^*
5,0	0,550	4	13–15	48	20	1,5
20,0	0,550	4	13–15	36	84	

* K_{20} и K_5 — коэффициенты скорости самоочищения воды от фенола в сосудах объемом соответственно 20 и 5 л.

Table 1

The influence of changes in the volume of water during sampling on the rate of self-purification from phenol in the water of the r. Akhtuba (February 2020)

Volume of water, l	Phenol concentration, mg / dm ³	Water sampling frequency, h	Water temperature, °С	Duration of the experiment, h	Volume of water at the end of the experiment, % of the initial volume	K_{20}/K_5^*
5,0	0,550	4	13–15	48	20	1,5
20,0	0,550	4	13–15	36	84	

* K_{20} and K_5 are the coefficients of the rate of self-purification of water from phenol in vessels with a volume of 20 and 5 liters, respectively.

Кроме различий в условиях постановки эксперимента, очевидно, что скорость самоочищения природных вод от загрязняющих веществ будет зависеть также от состояния микроорганизмов водных объектов в разные сезоны года.

Эксперименты, проведенные на воде р. Ахтубы, отобранной в районе, подверженном интенсивному промышленному и тепловому загрязнению, и р. Бузан на территории Красноярского района Астраханской области, показали, что при примерно одинаковых условиях (t °С воды, освещенность, объем воды, концентрация фенола, нелIMITирующие концентрации биогенных элементов) скорости процессов самоочищения воды от фенола отличались (табл. 2).

Таблица 2

Влияние изменения объема воды при отборе проб на скорость самоочищения от фенола воды р. Ахтубы (февраль 2020 г.)

Водный объект	Объем воды, л	Концентрация фенола, мг/дм ³	Периодичность отбора проб воды, ч	Температура воды, °С	Продолжительность эксперимента, ч	K_{20}/K_y
р. Ахтуба (февраль 2020 г.)	20	0,55	3	13–15	36	6,4
р. Бузан (сентябрь 2020 г.)	20	0,52	24	13–15	96*	
р. Ахтуба (май 2020 г.)	20	0,65	3	23–26	30	
р. Бузан (июнь 2020 г.)	20	0,67	4	24–27	64	

* На четвертые сутки обнаружено 0,35 мг/дм³ фенола, эксперимент прекращен.

Table 2

The influence of changes in the volume of water during sampling on the rate of self-purification from phenol in the water of the r. Akhtuba (February 2020)

Water an object	Volume of water, l	Phenol concentration, mg / dm ³	Water sampling frequency, h	Water temperature, °С	Duration of the experiment, h	K_{20}/K_y
R. Akhtuba (February 2020)	20	0,55	3	13–15	36	6.4
R. Buzan (September 2020)	20	0,52	24	13–15	96*	
R. Akhtuba (May 2020)	20	0,65	3	23–26	30	
R. Buzan (June 2020)	20	0,67	4	24–27	64	

* On the fourth day, 0,35 mg / dm³ of phenol was found, the experiment was terminated.

Особенно резко проявилось различие при низких значениях температуры, когда в воде р. Ахтубы фенол не был обнаружен уже через 1,5 сут., а в воде р. Бузан за 4 сут. было удвоено менее половины внесенного количества фенола.

Отличия были выявлены не только между водой из разных рек, но и для воды из одной и той же реки, отобранной в разное время года.

Ферментная активность в экспериментах не определялась, но данные по общей численности микроорганизмов и количеству сапрофитов в воде обеих рек позволили сделать вывод, что интенсивность процессов самоочищения зависит больше от активности микроорганизмов, чем от их численности. В некоторых

сосудах процесс самоочищения происходил быстрее при сравнительно малой численности микроорганизмов.

Таким образом, при решении конкретных задач, связанных с определением степени самоочищающей способности водных объектов от загрязняющих веществ, проведение экспериментов необходимо для каждого изучаемого участка водного объекта с учетом сезона года.

Результаты

На основании литературных данных [7—9] и результатов собственных исследований мы предлагаем следующие условия проведения эксперимента.

Во избежание нарушений газового режима и объема исследуемой воды во время отбора проб для анализа эксперимент следует проводить не в одном сосуде, а в нескольких сосудах, заполняемых из одной емкости с хорошо перемешанной водой. Количество сосудов должно соответствовать числу отбираемых проб воды, т.е. очередной сосуд выводится из эксперимента при отборе пробы воды для анализа.

Для проведения лабораторного эксперимента необходимо предусмотреть выполнение следующих условий.

Кислородный режим. Чтобы эксперимент проходил при достаточном для нормального протекания аэробных биохимических процессов содержании растворенного кислорода, до начала эксперимента следует проверить наличие условия

$$V_3(CO_2 - L_0) \sum m_i L_i \geq 3 \text{ мг/дм}^3, \quad (1)$$

где V_3 — объем природной воды, взятый для эксперимента, л; CO_2 — исходное (перед экспериментом) содержание кислорода в природной воде, мг/дм³; L_0 — значение пятисуточного или полного БПК природной воды, выбираемое для расчета в зависимости от длительности эксперимента, мг/дм³; L_i — соответственно значение БПК₅ или БПК_{полн}, выражающее биохимическое потребление кислорода 1 мг i -го загрязняющего вещества, добавляемого при эксперименте в природную воду, мг молекулярного кислорода; m_i — масса i -го загрязняющего вещества, мг.

Если в природную воду добавляется не само вещество, а определенный объем сточной воды, то условие (1) примет вид

$$CO_2 - L_0 - \frac{(L_{ct} - L_0)V_{ct}}{V_3 + V_{ct}} \geq 3 \text{ мг/дм}^3, \quad (2)$$

где L_{ct} — значение БПК₅ или БПК_{полн} сточных вод, выбираемое для расчета в зависимости от длительности эксперимента, мг/дм³; V_{ct} — объем сточной воды, добавляемой в природную воду для проведения эксперимента, л.

Объем природной воды. Выбор объема воды в сосуде для проведения эксперимента обусловлен выполнением условий (1), (2). Минимальным объемом можно считать 2 л, достаточные для проведения химического анализа. Влиянием границ (размеров экосистемы) на поведение микроорганизмов с их ограниченной способностью K перемещению можно пренебречь.

Температура водной среды. Стеклянные сосуды следует устанавливать в помещении или в стеклянном шкафу с терморегуляцией, где температура воздуха отличается от воды водного объекта не более чем на 3—4 °С (такое различие не вызывает сильных изменений в численности и активности микроорганизмов).

Освещенность. Сосуды нужно устанавливать в месте с естественным освещением, но без попадания прямых солнечных лучей.

Газовый режим. Для свободного газообмена через поверхность воды моделирование желательнее использовать сосуды с широким горлом, закрытые марлей от попадания пыли.

Наличие в воде минеральных форм азота и фосфора. Для фенола было установлено, что в исходной для эксперимента воде должно содержаться минерального фосфора не менее 10—15 мкг/дм³ на 1 мг загрязняющего вещества, минерального азота — не менее 100 мкг/л. Для речных вод эти условия обычно соблюдаются, и контроль за содержанием азота и фосфора не требуется. Для других загрязняющих веществ эти концентрации должны быть уточнены.

В ходе эксперимента проводится обязательное определение следующих показателей: температура воды, значения рН (оптимальные значения рН для разложения большинства загрязняющих веществ находятся в интервале 7—9), концентрация загрязняющего вещества, содержание растворенного кислорода.

Для биологически мягких веществ эксперимент проводится в течение 1—2 сут. с отбором проб на химический анализ через каждые 4—6 ч. Для других веществ отбор проб проводится через каждые 6—8 ч примерно до 70 % убыли загрязняющего вещества. Однако, если в течение пяти суток убыль загрязняющего вещества составляет всего 20 %, эксперимент целесообразно прекращать, а загрязняющее вещество относить к консервативному веществу. При снижении содержания кислорода ниже 2 мг/дм³ эксперимент продолжать также нецелесообразно, так как может происходить накопление недоокисленных промежуточных продуктов.

Расчет коэффициента скорости самоочищения речной воды от загрязняющего вещества по результатам лабораторного моделирования проводится по формуле

$$K = \frac{2,3}{(t-t')} \lg \frac{C_0}{C_t}, \quad (3)$$

где C_0 — начальная концентрация загрязняющего вещества, мг/дм³; C_t — концентрация через время t , мг/дм³; t — время, в течение которого практически не происходит изменение концентрации (время адаптации микроорганизмов), сут.

Обсуждение

Поскольку характер реакции в ходе деградациии рассматриваемого загрязняющего вещества может меняться, особенно если химический анализ проводится по групповым показателям содержания в воде органических веществ (нефтепродукты, СПАВ, фенолы, ВПК и т.д.), значения K , полученные за разные промежутки времени ($t = t'$) могут не совпадать. При различиях коэффициента K в пределах

20 % в качестве конечного результата берется среднее значение этого коэффициента, при больших различиях устанавливается связь типа $K=f(t-t')$.

Для некоторых органических веществ при определенных обстоятельствах (например, при наличии в воде ингибиторов биохимического окисления) [10] существенную роль в процессе самоочищения могут играть фотохимические реакции. Поэтому в результате лабораторного эксперимента следует также получить заключение о роли «светового» эффекта в убыли концентрации вещества. В случае существенной роли такого эффекта при использовании коэффициента K для различных расчетов или полевых исследований проводится соответствующая корректировка.

По результатам эксперимента, проведенного на речной воде в различные гидрологические сезоны, оцениваются и рассчитываются связи типа $K = f(t_0)$.

Заключение

Соблюдение одинаковых условий для получения коэффициента K позволит проводить обоснованное сравнение результатов лабораторного моделирования. Кроме того, при достаточном количестве информации по результатам лабораторных и натуральных исследований появляется возможность установления перехода от K , полученных в статичных лабораторных условиях, к наблюдаемым в естественных условиях водного объекта.

Список литературы

- [1] Айдаров И.П. К проблеме экологического возрождения речных бассейнов // Водные ресурсы. 2002. Т. 29. № 2. С. 240—252.
- [2] Баженова О.П. Качество воды и сапробность притоков среднего Иртыша и озер г. Омска // Омский научный вестник. 2010. № 1 (94). С. 219
- [3] Немировская И.А. Углеводороды в водах и донных осадках Белого моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 3 (105). С. 77—89.
- [4] Коробов В.Б. Некоторые проблемы применения экспертных методов на практике // Научный диалог. 2013. № 3 (15): Естествознание. Экология. Науки о земле. С. 94—108.
- [5] Мохова О.Н. О состоянии загрязненности вод Белого моря // Морские биологические исследования: достижения и перспективы: сб. материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, приуроченной к 145-летию Севастопольской биологической станции. Севастополь, 19—23 сентября 2016 г. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. 2016. С. 163—167.
- [6] Брызгалов В.А. Многолетняя и сезонная изменчивость химического стока рек Белого моря в условиях антропогенного воздействия // Экологическая химия. 2002. № 11 (2). С. 91—104.
- [7] Качество морских вод по гидрохимическим показателям: ежегодник, 2015. М.: Наука, 2016. 184 с.
- [8] Наумова А.М. Использование водных растений для очистки воды и грунта рыбохозяйственного водоема от органического и неорганического загрязнения // Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии. 2015. № 2 (14). С. 72—77.
- [9] Руководство по определению методом биотестирования токсичности вод, донных отложений, загрязняющих веществ и буровых растворов. М.: РЭФИА. НИА-Природа. 2002. 118 с.
- [10] Дженьюк С.Л. К обоснованию комплексной системы мониторинга морей Западной Арктики // Вестник Кольского научного центра РАН. 2015. № 2 (21). С. 94—102.

References

- [1] Aydarov IP. To the problem of ecological regeneration of river basins. *Water resources*. 2002;29(2):240—252. (In Russ.)

- [2] Bazhenova OP. Water quality and saprobity of tributaries of the middle Irtysh and lakes of Omsk. *Omsk Scientific Bulletin*. 2010;1(94):219 (In Russ.)
- [3] Nemirovskaya IA. Hydrocarbons in waters and bottom sediments of the White Sea. *Problems of the Arctic and Antarctic*. 2015;3(105):77–89. (In Russ.)
- [4] Korobov VB. Some problems of application of expert methods in practice. *Scientific Dialogue. Natural Science. Ecology. Earth Sciences*. 2013;3(15):94–108. (In Russ.)
- [5] Mokhova ON. On the state of water pollution in the White Sea. *Marine biological research: achievements and prospects: collection of materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation, dedicated to the 145th anniversary of the Sevastopol Biological Station*. Sevastopol, September 19–23, 2016. Sevastopol: ECOSY-Hydrophysics Publ. 2016. (In Russ.)
- [6] Bryzgalo VA. Multiyear and seasonal variability of chemical flow of the White Sea rivers under anthropogenic impact. *Ecological Chemistry*. 2002;11(2):91–104. (In Russ.)
- [7] Quality of sea waters by hydrochemical indicators: yearbook 2015. Moscow: Nauka Publ. 2016. (In Russ.)
- [8] Naumova AM. The use of aquatic plants for water and soil treatment of fishery ponds from organic and inorganic pollution. *Russian Journal of Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology*. 2015;2(14):72–77. (In Russ.)
- [9] Guidelines for determining the toxicity of water, bottom sediments, pollutants, and drilling fluids by biotesting. Moscow: REFIA, NIA-Priroda Publ. 2002. (In Russ.)
- [10] Dzhenyuk SL. To justification of the integrated monitoring system of the seas of the Western Arctic. *Bulletin of the Kola Scientific Center of Russian academy of sciences*. 2015;2(21):94–102. (In Russ.)

Сведения об авторе:

Кондрашин Кирилл Геннадьевич, младший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории приоритетных исследований региона, ассистент кафедры геодезии, кадастрового учета, АГАСУ, Российская Федерация, 414056, Астрахань, ул. Татищева, 18. ORCID: 0000-0001-7708-0043, SPIN-код: 2994-3840, Scopus Author ID 57212380321. E-mail: astrakhan_kirill@mail.ru

Bio note:

Kirill G. Kondrashin, Junior Researcher of the Research Laboratory for Priority Research of the Region, Assistant of the Department of Geodesy, Cadastral Registration, State Autonomous Educational Institution of Higher Education AGASU, 18 Tatishcheva St, Astrakhan, 414056, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-7708-0043, SPIN-код: 2994-3840, Scopus Author ID 57212380321. E-mail: astrakhan_kirill@mail.ru