

УДК 519.237:504.4:543.31

Т. А. Кондратьева, Ю. В. Максимов, Р. Н. Исмаилова

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ НА ПРИМЕРЕ Р. КАЗАНКА

Ключевые слова: поверхностные воды, антропогенное воздействие, статистика, кластерный анализ, факторная нагрузка, уравнение регрессии.

Проведена статистическая обработка многолетней гидрохимической и гидробиологической информации по р. Казанка. Выявлены тенденции к увеличению концентрации сульфатов и снижению концентраций органических веществ, а также ряда других загрязняющих веществ. Установлено влияние определенных концентраций загрязнителей в р. Казанка на определенные группы организмов, что позволило создать модель «воздействие – отклик».

Keywords: surface water, anthropogenic impact, statistics, cluster analysis, factor loading, the regression equation.

Statistical processing of many years of hydrochemical and hydrobiological information on p. Kazanka. The trends in increased concentrations of sulfate and reduce the concentrations of organic compounds, as well as a number of other pollutants. The influence of the concentration of certain pollutants in r. Kazanka on certain groups of organisms, thereby creating a model of the "Impact - Response".

Введение

Рост антропогенной нагрузки на окружающую среду во второй половине XX века привели к обострению многих экологических проблем. Возможные перспективы их решения связаны с реализацией концепции «устойчивого развития» – стабильного сосуществования человечества и природы [1]. Важные элементы данной концепции – сохранение и воспроизводство ресурсной базы народного хозяйства, улучшение структуры природопользования на основе объективной характеристики экологической ситуации [2], наконец, это состояние здоровья человека. Всё это требует разработки алгоритмов оценки устойчивости экосистем, изучения закономерностей их динамики, совершенствования методики оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС), включающей эколого-экономический прогноз [3], изучение и оценки комбинированного воздействия техногенных нагрузок на экосистему в целом.

Ведущая роль в перечисленных исследованиях принадлежит количественным методам. При этом следует особо подчеркнуть роль системного анализа как основного инструмента исследования экологических систем различного уровня, когда проведение широкомасштабных натурных исследований и экспериментов зачастую невозможно или затруднено [4].

Из всех природных сред наибольшему антропогенному загрязнению подвержены поверхностные воды за счёт поступления сточных вод промышленных предприятий и хозяйственно-бытовых стоков, поверхностного стока с городских и сельскохозяйственных территорий, за счет загрязнения, вносимого атмосферными осадками.

Водная среда является индикатором экологического состояния не только водосборных

площадей, но и природно-экономических регионов в целом, что требует систематического обследования ее состояния, использования современных методов обработки большого количества данных об ее составе для принятия управленческих решений при прогнозировании дальнейшего состояния рек, водохозяйственном планировании, оценке экологической ситуации в местах выпуска сточных вод [5].

В связи с этим цель данной работы – разработка комплексного подхода для оценки воздействия антропогенных и природных факторов на водные биоценозы реки Казанка.

Для решения поставленной цели был определен следующий круг задач: анализ изменчивости гидрохимических и гидрологических показателей р. Казанка; оценка влияния антропогенных факторов на формирование качества поверхностных РТ; установление связей и закономерностей временной изменчивости системы «воздействие – отклик»; разработка прогнозной математической модели.

Экспериментальная часть

Для выявления и оценки последствий антропогенного воздействия на речные экосистемы р. Казанка был проведен сбор многолетней режимной гидрохимической информации, полученной при проведении наблюдений Государственной сетью наблюдения и контроля за загрязнением поверхностных вод суши (ГСН) на территории Республики Татарстан с 1990г. по 2011г. Также была использована информация ФГБУ «УГМС Республики Татарстан» по результатам регулярных гидробиологических наблюдений в этом же створе с 2008г. по 2011г. Данный створ расположен в черте г. Казань в районе 3-ей транспортной дамбы. Гидрологические данные

использованы по результатам наблюдений на водном посту н.п. Верхний Услон, а данные по расходам воды в реке – по водному посту н.п. Арск. Также были использованы данные по количеству выпавших атмосферных осадков и температуре воздуха по результатам режимных наблюдений на метеостанции н.п. Арск.

Для анализа использовали данные по концентрациям легко окисляющихся органических веществ (по БПК и ХПК), азота (нитратного, нитритного, аммонийного), фосфора (фосфатов), сульфатов, хлоридов, фенолов, нефтепродуктов, а также соединений меди, железа и цинка, СПАВ, а также показатели численности гидробионтов: численность общая фитопланктона (N тыс.кл./л), синезеленых водорослей (Ncn), эвгленовых (Neug), динофитовых (Ndin), диатомовых (Nbac), криптофитовых (Ncpr), золотистых (Nchr), зеленых (Nchl), численность коловраток (Nrot), ветвистоусых ракообразных (Nclad), веслоногих ракообразных (Ncop), олигохет (Nolyg), моллюсков (Nmoll), хирономид (Nchir), прочих бентосных групп (Nпроч).

Был проведен кластерный, корреляционный, многофакторный анализы с применением метода главных компонент МГК. При помощи регрессионного анализа построены модели влияния различных гидрологических и гидрохимических параметров водной среды на гидробионтов. Для работы использован пакет программ «Statistica 6.0».

Результаты и их обсуждение

В естественных природных условиях компонентный состав водной среды речных экосистем формируется под влиянием таких факторов, как: характер питания реки, который определяет возможность стока воды в русло реки по поверхности водосбора или после фильтрации через толщу почв и грунтов; количество выпадающих атмосферных осадков; интенсивность снеготаяния; уклон и состояние поверхности водосбора фильтруемой почвы.

В современных условиях интенсивного природопользования нередко определяющим фактором в трансформации компонентного состава водной среды становится антропогенное воздействие на речные экосистемы.

Несмотря на то, что основным водопотребителем выступает производство (53.8% от общего водопотребления), а жилищно-коммунальное хозяйство занимает лишь вторую позицию (35.0%), именно оно главный источник сбросов загрязненных сточных вод (75.7%), вклад производства составляет лишь 23.4% [6].

Анализ многолетней изменчивости комбинаторного индекса загрязненности водной среды за последние 10 лет позволил оценить состояние р. Казанка как стабильно «грязное».

К приоритетным показателям загрязненности р.Казанка относятся органические вещества по ХПК и БПК₅, азот нитритный, соединения меди и железа, нефтепродукты, азот аммонийный, сульфаты,

фосфаты [7]. Рассчитанное значение доли антропогенного воздействия характеризует состояние экосистем как переходное от равновесного к кризисному.

Для реки Казанка отмечается тенденция к увеличению концентраций сульфатов (рис. 1) и снижению концентраций органических веществ по ХПК. На рисунке 1 видно, что процесс центрирован, но находится в неуправляемом состоянии, так как точки два и четыре выходят за контрольные границы 2 сигма. Это свидетельствует о том, что вероятность высокой изменчивости состава поверхностных вод велика, а потому велика и погрешность измерений в период с 1990-1994 гг. Однако концентрация хлоридов в р.Казанка в течение всего периода наблюдений не превышает ПДК (300 мг/дм³). Для нижнего течения р. Казанка вообще характерно повышенное содержание сульфатов. Их концентрация в 4-5 раз превышает содержание сульфатов в большинстве других рек республики.[2]. Данное обстоятельство объясняется генезисом вод, выщелачивающих гипс пермских известняков [3].

Повышенные значения ХПК, превышающие ПДК (30мг/дм³), наблюдалась в р.Казанка с 1991 по 2000 гг. Период с 2001 по 2011 гг. характеризуется меньшей изменчивостью и снижением значений в пределах ПДК.

Обобщение и сравнительный анализ долгопериодной режимной информации по уровню содержания в водной среде минеральных форм азота показал высокую межгодовую изменчивость их концентрации в исследуемой реке. Однако для азота нитритного наблюдается стабилизация процесса (размах уменьшается).

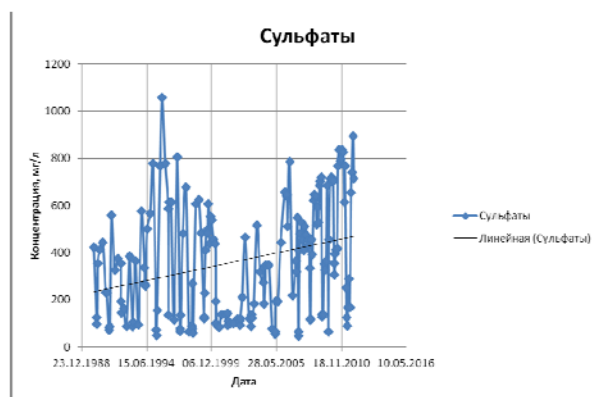


Рис. 1 - Динамика содержания сульфатов, мг/л (а)

По всем формам азота наблюдаются незначительное превышение ПДК (менее 2) в некоторые сезоны года, однако чаще это происходит во время весеннего половодья и снеготаяния, когда смыл с полей интенсивен. Таким образом, отмечаемая тенденция накопления минеральных форм азота на фоне высокой изменчивости их концентраций подтверждает преобладающую роль антропогенного фактора в трансформации ионного стока р. Казанка.

Также анализ показал, что по содержанию фенола на протяжении всего периода наблюдений заметна высокая изменчивость показателя. Однако

наблюдается стабилизация процесса и тенденция к уменьшению содержания фенола (вплоть до нулевого содержания) в р.Казанка. Значительно снизилась кратность превышения ПДК (не более 2 ПДК). Для нефтепродуктов наоборот наблюдается тенденция к увеличению содержания, причем поступление преимущественно с тальми водами в результате смыва с урбанизированных территорий.

В целом можно сделать вывод о том, что превышение ПДК фенолов и нефтепродуктов в р.Казанка является следствием высокой антропогенной нагрузки, а именно сброса сточных вод городских ливневок и деятельностью предприятий органического синтеза. По содержанию тяжелых металлов в воде в р.Казанке наблюдается тенденция к снижению. Хотя по содержанию меди ситуация остается напряженной, так как наблюдается значительное превышение ПДК во всех пробах. А по содержанию железа ситуация значительно лучше (превышение ПДК редко превышает 2-3). Вероятно, это связано с экономическим кризисом 1998 года, когда темпы промышленного производства значительно снизились. Однако в последние годы с возрождением производства наблюдается некоторое увеличение в стоке р. Казанка данных загрязнителей.

Анализ многолетней режимной информации показал, что для р. Казанка характерно периодическое, достаточно значительное накопление в водной среде перечисленных загрязняющих веществ на фоне временной изменчивости их концентраций.

В новом тысячелетии, особенно в последние годы, отмечается тенденция снижения концентрации по фенолам, нефтяным углеводородам, соединениям железа [8, 9]. Это характерно и для р. Казанка.

Методы многомерной статистики применяются для составления обобщенных показателей. В данном случае реальный экологический объект (поверхностные воды реки Казанка) представляется как многомерный вектор параметров, количественно определяемый матрицей средних значений компонентов и матрицей дисперсий-ковариаций (корреляцией).

При проведении кластерного анализа выделилось 2 больших кластера, первый из которых объединил фитопланктон, а второй – зоопланктон и зообентос. Однако в группу с фитопланктоном попали и Nmol (моллюски) – представители зообентоса.

То есть, выдвинутое нами предположение, что изменение концентраций поллютантов прямо воздействует лишь на фитопланктон, а на зоопланктон и зообентос – опосредовано через трофические цепи, полностью подтвердился, что наглядно демонстрирует дендрограмма (рис.2).

По результатам корреляционного анализа можно выявлено, что группы фитопланктона не находятся в тесной зависимости от содержания кислорода. Более того не установлено их какой-либо значимой зависимости от концентраций хрома и

фенола. Прямая зависимость от концентраций СПАВ наблюдается только для группы диатомовых ($r=0,64$), а по нефтепродуктам – для золотистых. По концентрациям железа наметилась прямая зависимость для группы сине-зеленых водорослей (что, вероятно, объясняется использованием железа организмами в качестве строительного материала), и отрицательная у эвгленовых ($r=-0,44$) и зеленых водорослей ($r=-0,50$).

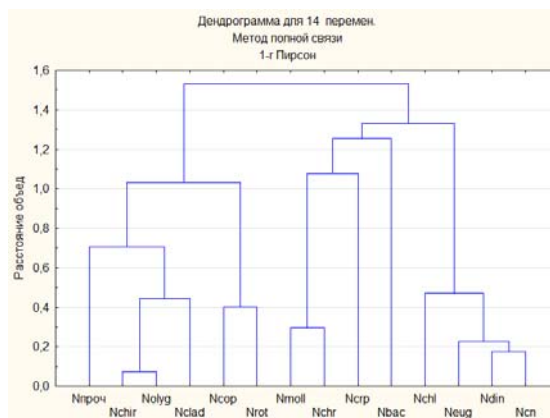


Рис. 2 - Дендрограмма объединения фито-, зоопланктона и зообентоса

Как отмечают многие исследователи, приоритетный источник загрязнения для р. Казанка – органические вещества. Однако для фитопланктона однозначно подтвердить этот факт не представляется возможным. Так все группы, за исключением сине-зеленых водорослей (Ncn), оказались не чувствительны к соединениям азота, а сине-зеленые водоросли проявили заметную прямую зависимость от наличия в воде азота аммонийного и в то же время слабую отрицательную связь от других форм азота. Для сине-зеленых также характерна высокая отрицательная связь с хлоридами и умеренная отрицательная связь с сульфатами. Значимая связь с фосфатами наблюдается у группы криптофитовых водорослей. Умеренная положительная связь с сульфатами наблюдается у криптофитовых и зеленых, а для эвгленовых водорослей она отрицательная. К фосфатам отрицательную связь показали динофитовые и зеленые водоросли.

Компонентный анализ переменных показал, что четыре главные компоненты содержат 65% накопленной дисперсии. В таблице представлены факторные нагрузки после вращения осей главных компонент по критерию Varimax [10].

Смысловую интерпретацию проведем по фактограммам на рисунке 3.

Интерпретируя факторы, можно заметить, что наметились связи между приоритетными загрязнителями и различными группами организмов: в большей степени – это сульфаты, хлориды, нефтепродукты, фосфаты, железо; в меньшей степени – хром и фенол. Таким образом, можно классифицировать загрязнители по влиянию на живые организмы. Наиболее тесные связи были положены в основу составления регрессионных моделей, описывающих состояние биоценозов.

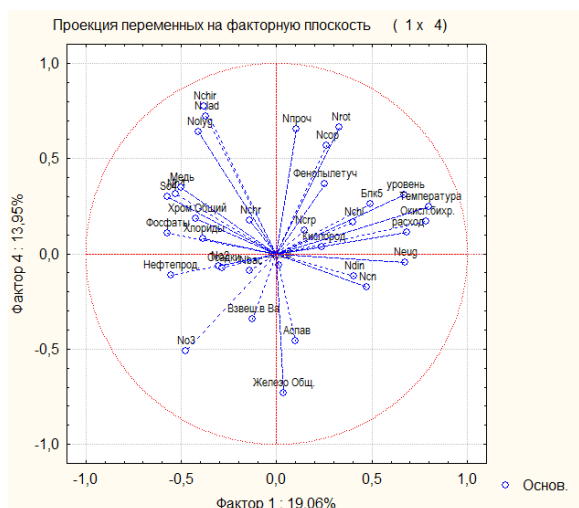


Рис. 3 - Факторные нагрузки

Данные факторы позволили выявить влияние определенных концентраций загрязнителей в р.Казанка на определенные группы организмов. Это в свою очередь позволило создать модель «воздействие – отклик», описываемую через уравнения регрессии (табл. 1).

Таблица 1 - Уравнение регрессии основных показателей

Группа-индикатор	Ингредиент	Уравнение регрессии
Nchr	SO ₄ , NH ₄	$Nchr = -268 + 2,66SO_4 + 830NH_4$
Ncn	CL ⁻ , Q	$Ncn = 66443 - 255Q - 1418CL^-$
Nmoll	PO ₄ , Cr	$Nmoll = 316 - 3973PO_4 - 13Cr$
Nchir	NH ₄ , SO ₄	$Nchir = -267 + 2,65NH_4 + 830SO_4$

Так, золотистые водоросли (группа Nchr) реагируют на воздействие сульфатов и азота аммонийного увеличением своей численности. Численность сине-зеленых водорослей (группа Ncn) уменьшается с возрастанием концентраций хлоридов и увеличением расхода воды. Численность моллюсков увеличивается (группа Nmoll) при насыщении кислородом, но уменьшается в присутствии фосфатов и хрома. И, наконец, численность личинок хирономид (Nchir) уменьшается при наличии высоких концентраций железа и в меньшей степени азота нитратного

Применение многофакторного анализа позволило выделить главные компоненты водных биоценозов, характеризующие наибольшие корреляционные связи в системе «воздействие – отклик». Иными словами, среди видового разнообразия выделились группы-индикаторы, которые изменением своей численности указывают на присутствие определенных химических загрязнителей с высокими показателями концентраций.

Подводя итог вышесказанному, можно констатировать, что в р. Казанка наблюдается деградация экосистемы. Но не за счёт гибели организмов, а за счет формирования специфических сообществ, адаптировавшихся к данным условиям водоема. На рисунке 4 отражена сезонная динамика общей численности фитопланктона и коэффициента ИЗВ по органике (рассчитано как медиана).

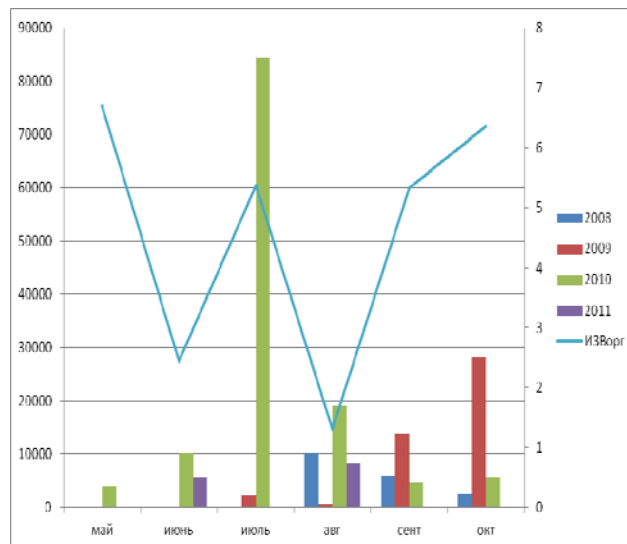


Рис. 4 - Сезонная динамика численности групп гидробионтов и медианных значений коэффициента ИЗВорг (органика)

Это позволяет говорить об обратимости процесса, т.е. о сохраняющейся способности р. Казанка к самоочищению.

Заключение

В процессе исследования выяснилось, что существующие факторы не дают стопроцентного объяснения процессов, происходящих в биоценозе. Поэтому уравнения регрессии, описывающих состояние биоценоза, дают высокую погрешность. Вероятно, мощным фактором выступает деятельность микроорганизмов (бактерий, простейших) наличие специфических (например карбонатных) пород, которые растворяются в водах р.Казанка. В какой-то степени оказывает влияние водохранилище, создающее сезонный подпор и обратное течение, а также атмосферные осадки.

Как видно из вышеизложенного, кластерный, корреляционный и факторный анализы дают хорошие результаты для исследования водных экосистем. А моделирование с использованием уравнения регрессии вкупе с проекцией наблюдений на факторную плоскость дают очень наглядные результаты, позволяющие быстро и всесторонне оценить процессы, происходящие в экосистеме, и получить прогноз их состояния. Добавив на факторную плоскость наблюдения можно также оценить качество, достоверность используемой модели экосистемы

Литература

1. А.М. Никаноров, В.В. Иванов, В.А. Брызгалов, *Реки Российской Арктики в современных условиях*

антропогенного воздействия. НОК, Ростов-на-Дону: 2007. 280 с.

2. А.М. Никаноров, С.Д.Захаров, В.А. Брызгалов, Г.Н.Жданова. Реки России. Часть III. Реки Республики Татарстан (гидрохимия и гидроэкология). Ростов-на-Дону, 2010. 192 с.
3. *Малые реки Волжского бассейна*. М.: МГУ, 1998. 233 с.
4. А.М. Никаноров, В.А. Брызгалов. *Пресноводные экосистемы в импактных районах России*. НОК, Ростов-на-Дону. 2006. 275 с.
5. А.А. Курманова, В. кн. *Рациональное использование и охрана природных вод бассейна Средней Волги: Комплексное использование и охрана водных ресурсов* (УралНИИВХ), Свердловск, 1990. С. 96-103.
6. А.В. Иванов, Е.А. Тафеева, *Состояние водных ресурсов и условия водоснабжения населения в нефтедобывающих районах Республики Татарстан*. Водные ресурсы, 3, 273-282. (2006).
7. Т.А. Кондратьева, С.Д. Захаров, Г.Н. Жданова, Р.Н.

Исмаилова, *К вопросу о региональных особенностях качества водных объектов на территории Республики Татарстан*, Вестник Казанского технологического университета, 11, 45-49 (2012).

8. Т.А. Кондратьева, Р.Н. Исмаилова, О.И. Волостнова, *Выявление закономерностей пространственного распределения загрязнения поверхностных вод Республики Татарстан с использованием методов многомерной статистики. Сообщение 1: кластерный анализ и методом главных компонент*, Вестник Казанского технологического университета, 18, 275 – 281 (2013).
9. А.П. Демин, *Тенденции использования и охраны водных ресурсов в России*, Водные ресурсы, 6, С.735-754 (2000).
10. Л.Ф. Сердюцкая, *Системный анализ и математическое моделирование экологических процессов в водных экосистемах*, Книжный дом «Либроком», Москва, 2009, 144 с.

©Т. А. Кондратьева - канд.биол.наук, ведущий гидробиолог КЛМС, tatjana_kondrate@mail.ru; Ю. В. Максимов - гидролог 2-ой категории Упр-я по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды РТ; Р. Н. Исмаилова – канд. хим. наук, доц. каф. аналитической химии, сертификации и менеджмента качества КНИТУ, isma_70@mail.ru.