

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 натуральных 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 определён 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 (N_{сн}), эвгленовых (N_{еуг}), динофитовых (N_{дин}), диатомовых (N_{бас}), криптофитовых (N_{ср}), золотистых (N_{чгр}), зеленых (N_{chl}), численность колеровок (N_{рот}), ветвистоусых ракообразных (N_{клад}), веслоногих ракообразных (N_{сop}), олигохет (N_{ол}), моллюсков (N_{мол}), хирономид (N_{чир}), прочих бентосных групп (N_{проч}). 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 смыв 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 талыми 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 N moll (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	$Nchr = -268 + 2,66SO_4 + 830Nh_4$
Ncn	CL ⁻ , Q	$Ncn = 66443 - 255Q - 1418CL^-$
Nmoll	PO ₄	$Nmoll = 316 - 3973PO_4 - 13Cr$
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.

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 вкуче 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