

**НАУЧНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ  
СИСТЕМ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА  
ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД СУШИ<sup>12</sup>**

Баренбойм Г.М., Веницианов Е.В., Авандеева О.П., Чиганова М.А.  
Институт водных проблем РАН, г. Москва  
gbarenboim@gmail.com

Проблемы охраны природных вод суши и восстановления устойчивого экологического состояния водных объектов относятся к числу наиболее актуальных, в глобальном масштабе.

Россия богата водными ресурсами и суммарный водозабор составляет менее 2% от доступных водных ресурсов, однако вследствие неравномерности распределения ряд российских регионов испытывает дефицит воды применительно к некоторым видам водопользования, в первую очередь к питьевому и сельскохозяйственному потреблению. Особенно серьезной является проблема плохого качества вод, создающая дефицит воды даже при количественном избытке водных ресурсов.

По данным Государственного доклада «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2012 году» (более поздние аналогичные доклады отсутствуют) в 2012 г. на территории Российской Федерации было зарегистрировано 1913 случаев высокого и экстремально высокого загрязнения поверхностных вод. Согласно названному докладу в течение ряда лет поверхностные воды бассейна реки Волги в большинстве створов оценивались как «загрязненные» и «грязные».

Управление качеством вод невозможно без достоверной и полной информации об управляемой системе. Значительная часть такой информации генерируется путем инструментального наблюдения за водными объектами и природными и антропогенными факторами воздействия на них. Последующая обработка данных должна обеспечить управление качеством вод, используя варианты решений, сформированные на основе результатов этой обработки, включая моделирование и использование базы знаний. В целом, эти операции осуществляются системой мониторинга (СМ) водных объектов

---

<sup>12</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проекта № 14-17-00672).

(ВО), которую можно рассматривать как информационную основу системы поддержки принятия решений с целью повышения эффективности использования и охраны водных ресурсов [1].

Современные автоматизированные СМВО представляют собой наукоемкие и высокотехнологичные системы, требующие достаточно больших затрат, и имеющие разные масштабы – от локального до бассейнового, а на административном уровне – от муниципального до регионального и федерального. При этом работа систем разного уровня должна быть согласована, основана на бассейновом принципе и возможности использования многолетних рядов данных наблюдений.

Методология проектирования таких СМВО со всеми прямыми и обратными связями между компонентами в настоящее время в России отсутствует. Она должна включать проектирование СМВО для комплекса «водосбор – река (водохранилище) – устье – море (озеро)» как единого целого. В работе рассматривается только СМВО с элементами мониторинга территории водосбора (ВС).

Первоначальной основой проектирования СМВО является детальный анализ состояния ВО и ВС как объектов мониторинга, включая географические, климатические, гидрогеологические, гидрологические, гидрофизические, гидрохимические, и гидробиологические аспекты состояния ВО, а также аспекты, связанные с его хозяйственным использованием и оценкой источников загрязнения.

Аналізу также подлежит состояние уже существующих СМВО этого ВО и его ВС. Сведения, получаемые в результате предпроектного обследования, позволяют сформулировать цели и задачи проектируемого СМВО с учетом бассейнового принципа.

При проектировании СМВО, ориентированной на мониторинг качества вод, должно быть учтено все разнообразие веществ, загрязняющих данный ВО. Разработке подлежит также методология учета распределенных источников загрязнения вод и их вклада в общее загрязнение вод.

В результате различных видов хозяйственной деятельности на водосборных площадях и влияния природных факторов в бассейны крупных рек может поступать несколько тысяч различных химических соединений, которые под влиянием комплекса физико-химических и биологических факторов образуют большее число производных. Практически при мониторинге количество регистрируемых веществ исчисляется несколькими десятками.

При этом концентрации анализируемых веществ могут быть намного ниже ПДК, а вода, тем не менее, может проявлять значительную токсичность вследствие синергизма компонентов или наличия неучтенных ингредиентов. Это существенно сокращает информативность гидрохимических показателей. Естественным представляется использование биологических, в том числе гидробиологических методов с последующей оценкой экологических рисков. Однако только конкретный анализ химического состава вод дает возможность установить источники загрязнения. Поэтому обсуждаемые системы мониторинга должны базироваться как на гидрохимических, так и гидробиологических показателях.

Среди функций СМВО высокую сложность представляет анализ органических веществ, мониторинг которых необходим в силу того, что органические соединения имеют огромное значение в формировании качества вод и в жизнедеятельности гидробионтов; многие из них являются токсичными; среди них содержится подавляющее число мутагенов и канцерогенов. Некоторые органические соединения в водной среде и донных отложениях трансформируются, приобретая новую структуру и свойства, в том числе токсичность большую, чем у исходных веществ. В общем массиве химических соединений, известных человечеству, подавляющее большинство принадлежит органическим веществам. Особую роль в загрязнении водных объектов органическими веществами играют лекарственные вещества и их метаболиты [2].

В России мониторинг органических соединений водных объектов ведется в очень ограниченных и явно недостаточных масштабах по сравнению с их повсеместной распространенностью в окружающей среде. В развитии мониторинга лекарственных загрязнений вод Россия вообще отстает на 15–20 лет. Современные методы определения класса или индивидуальной химической структуры органических соединений чаще всего основаны на применении хромато-масс-спектрометрического анализа проб воды и донных отложений [3], требуют заметных затрат, квалифицированного персонала, наличия стандартных образцов анализируемых веществ, которые могут отсутствовать для вторичных продуктов и т.д. Оптимизация проектной разработки применительно к мониторингу органики может быть достигнута за счет создания ограниченного перечня приоритетных органических ксенобиотиков, первым этапом которого является формирование регистра химических веществ, используе-

мых или (и) производимых на территории водосбора с оценкой их вероятности (возможно, по экспертным оценкам) попадания в водную среду, оценкой опасности для гидробиоты и населения.

При этом оценка опасности должна производиться как по данным нормативных документов (ПДК, ОДК) отечественной и зарубежной разработки (последнее – в целях общей ориентации), так и с использованием международных, национальных и принадлежащим отдельным научным и образовательным организациям регистров (баз данных) опасных веществ, суммирующих их физико-химические характеристики и оценки биологической активности. Использование таких регистров также целесообразно при обнаружении в процессе мониторинга веществ, для которых отсутствуют нормативы. Так, например, в водах и донных отложениях Чебоксарского водохранилища было идентифицировано около 80-ти органических соединений, причем ПДК оказалась известна только для 9-ти.

При составлении таких приоритетных списков существенную помощь может оказать применение расчетных методов оценки токсичности, основанных на фундаментальной связи между химической структурой вещества и его биологической активностью (см. обзор в [4]). Должны быть также использованы различные базы данных, относящиеся к лекарственным веществам. Их применение, в частности, позволило по результатам аналитических исследований выявить в водных объектах – источниках питьевого водоснабжения Москвы 47 лекарств (активное начало) и 38 метаболитов лекарственного происхождения [4].

При проектировании СМВО следует принимать во внимание возможные экстремальные загрязнения ВО нефтью и нефтепродуктами. Высокие риски таких загрязнений существуют не только в районах добычи нефти, но при транспортировке и хранении нефти и нефтепродуктов, а также при переработке нефти.

Нефть представляет собой многокомпонентную смесь углеводородов (УВ) с примесью неорганических составляющих. При попадании в водный объект компоненты этой смеси распределяются по горизонтам толщи воды и донными отложениями в зависимости от своей плотности, гидрофильности/гидрофобности и других физико-химических свойств. Для контроля нефтегенного загрязнения вод в настоящее время определяется концентрация «нефтепродуктов» (термин в аналитике, характеризующий сумму гидрофобных УВ), что является достаточным для оценки опасности (путем срав-

нения с ПДК для «нефтепродуктов») для сравнительно небольших нефтегенных загрязнений.

Однако при экстремальных нефтегенных загрязнениях, связанных с аварийными разливами нефти или нефтепродуктов, такой подход недостаточен. Требуется оценка послойного, включая донные отложения, содержания основных индивидуальных УВ и/или их химических групп, хлорированных УВ, некоторых вторичных продуктов трансформации УВ, неуглеводородных компонентов нефти (тяжелых металлов, радионуклидов) и т.д. [5, 6]. Участки водных объектов, где возможны такие разливы, приводящие к чрезвычайным экологическим ситуациям, должны быть выделены в зоны повышенного экологического риска, которые, в свою очередь, требуют организации специальных видов мониторинга: профилактического, аварийного и поставарийного.

Перечень приоритетных показателей, по которым необходимо осуществлять мониторинг последствий аварийных разливов нефти и нефтепродуктов для конкретных типов (сортов) нефти следует определять заранее, т.е. создавая экологический «паспорт» нефти. Он должен включать качественную и количественную характеристики нефти по содержащимся в ней основным нефтегенным компонентам, с выделением перечня приоритетных загрязняющих веществ (ЗВ) и привносимых ими токсических эффектов. Также такой «экопаспорт» нефти позволяет идентифицировать источник аварийного разлива нефти в случае, если он не известен, по различным признакам, в том числе по соотношению отдельных нефтегенных компонентов, например металлов.

В целом, в процессе проектирования СМВО для каждого водного объекта необходимо разработать перечень приоритетных показателей, определяющих специфику и структуру загрязнения такого объекта, что производится на стадии предпроектных обследований.

Измерительные комплексы в рамках СМВО, в целом, должны использовать контактные и дистанционные методы измерения. Контактные методы реализуются путем прямого измерения в водном объекте или отбора проб и производства измерений в полевых/стационарных лабораториях. Носителями дистанционных измерительных средств могут быть наземные, водные, воздушные и космические платформы. Целесообразно использовать автоматические посты измерения компонентов качества воды, особенно в случае выявления зон высокого экологического риска на наблюдаемом ВО.

Для комплексной оценки качества вод и повышения надежности прогнозов используют методы биотестирования для оценки интегральной токсичности и биоиндикации. Помимо классических гидробиологических методов тестирования перспективным является использование биодатчиков клеточного, субклеточного, биохимического и молекулярного уровней, в том числе специализированных биодатчиков, полученных с использованием методов генной селекции и генетической инженерии и способных реагировать на присутствие определенных классов или индивидуальных химических соединений. Перспективным является применение узкоспецифичных биодетекторов, в которых реакция биологического детектора сразу вызывает изменение электрического сигнала.

Роль автоматизированных постов мониторинга с дистанционной передачей данных в составе СМВО должна быть значительно увеличена. Необходимо также четко определить оптимальные области применения мобильных и переносных лабораторий и увеличить долю измерений, осуществляемых непосредственно на водном объекте, в том числе в непрерывном режиме.

Информационная система мониторинга водных объектов помимо сбора и первичной обработки данных, активного использования ГИС, а также управления автоматическими постами должна обеспечивать возможность моделирования различных, связанных с качеством вод, процессов: гидрологических, отвечающих за перенос ЗВ в водном объекте; физико-химических, характеризующих обмен веществ между водной массой и донными отложениями; гидробиологических, способствующих деструкции и трансформации ЗВ. Информационная система должна также иметь возможность учета изменений антропогенной нагрузки на водосборе и в самом ВО, включая влияние глобальных климатических изменений на качество вод, оценку токсичности ЗВ (в том числе при их трансформации), в первую очередь, – опасных ксенобиотиков, а также прогностического моделирования качества вод в целом.

В рамках проектирования СМВО геоинформационные системы (ГИС) дают возможность перейти к использованию ГИС-моделей и методов математической статистики, в том числе определению корреляционных связей между различными слоями ГИС. Следует отметить необходимость построения в рамках ГИС экотоксикологических карт, отображающих распределение концентраций обнаруженных ксенобиотиков с указанием вида токсичности, карт распре-

деления источников загрязнения как слоев ГИС, представление коррелятивных отношений между ними. При этом следует разрабатывать варианты экспертных решений как сценариев для лиц, принимающих решения. Перспективным является использование в современных информационных системах мониторинга управляющих хранилищ, элементов искусственного интеллекта и других информационных технологий, позволяющих предлагать сценарии минимизации экологических рисков.

В целом, проектирование является необходимым, самостоятельным и наукоемким этапом создания систем мониторинга водных объектов.

### Литература

1. Баренбойм Г.М., Веницианов Е.В. Современные проблемы мониторинга водных объектов// Статьи и тезисы. IX Междунар. симпозиум «Чистая вода России–2007».17 – 20 апреля 2007 г. Екатеринбург. Екатеринбург: ФГУП РосНИИВХ, 2007. С. 16-29.

2. Баренбойм Г.М., Чиганова М.А. Загрязнение поверхностных и сточных вод лекарственными препаратами // Вода: химия и экология, №10, 2012. С.40-46.

3. Баренбойм Г.М., Чиганова М.А., Березовская И.В. Особенности загрязнения поверхностных водных объектов компонентами лекарственных средств // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, № 3, 2014. С. 131-141.

4. Баренбойм Г.М., Чиганова М.А. Загрязнение природных вод лекарствами. – М.: Издательство «Наука», 2015. – 284 с. (в печати).

5. Баренбойм Г.М. Автоматизированные системы раннего обнаружения и мониторинга аварийного разлива нефти. Основные научные и технологические принципы /Г.М. Баренбойм, П.Ф. Шульженко, А.В.Галкин, Ю.М. Поляков.– М.: Саров: Российский федеральный ядерный центр–ВНИИ экспериментальной физики, 1998. 107 с.

6. Авандеева О.П. Методические аспекты мониторинга качества вод для зон повышенного экологического риска нефтегенных загрязнений (на примере Чебоксарского водохранилища): Автореф. дисс. канд. геогр. наук. – М., 2015. – 22 с.