

И.А. Шишкин, П.В. Луканин, А.П. Ткаченко  
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,  
г. Санкт-Петербург, Россия

## **УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ И НОРМИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ БАССЕЙНОВЫХ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

Развитие современных систем управления техногенной нагрузкой для обеспечения устойчивого использования водных ресурсов основывается на применении инновационных геоинформационных технологий при разработке территориально-бассейновых схем комплексного использования и охраны водных объектов. Это предопределяет необходимость создания геоинформационных моделирующих систем (ГИМС) с возможностью имитационного моделирования и поддержки принятия решений для широкого класса взаимосвязанных и взаимообусловленных задач при минимизации техногенных взаимодействий на окружающую среду.

К основным задачам и подзадачам при регионально-бассейновом межотраслевом подходе относится следующий далеко не полный перечень, и в первую очередь, это создание моделей территориально-производственных комплексов (ТПК) в рамках «Схем комплексного использования и охраны водных объектов». Модель такого рода на геоинформационной основе позволяет реализовать концепцию обоснований принятия решений по масштабам и очередности нового строительства или развития действующих, наиболее важных хозяйственных объектов, перераспределение трудовых, материальных, финансовых ресурсов, необходимых для развития ТПК с одновременным обеспечением как экологических, так и технологических нормативов.

Имитационная модель ТПК, связанная с геоинформационной моделью речного бассейна, позволяет реализовать комплексный подход на межотраслевом уровне с учетом региональных природных условий и особенностей. При этом, возникает необходимость создания единой базы данных и базы знаний для бассейновых природно-технических систем и природно-производственных комплексов. Анализ созданной базы данных на ГИМС основе позволяет утвердить или изменить концепцию экономической и социальной структуры и специализации района или бассейна в целом, что явится основой для перераспределения квот нагрузки в виде норм допустимых сбросов (НДС) для отдельных субъектов территориально-бассейнового производственно-технического комплекса с обеспечением наилучших достижимых технологий (НДТ) в пределах бассейновых норм допустимых воздействий (НДВ).

Однако до настоящего времени не разработаны единые методические основы и программное обеспечение для реализации взаимоувязанных в пределах речного бассейна проектов индивидуальных для каждого водопользователя норм допустимых сбросов (НДС), проектов бассейновых норм допустимых воздействий на водный объект (НДВ) и схем комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО) по подавляющему большинству бассейнов рек и озер для Северо-Западного региона России. Анализ результатов проведенных экологических экспертиз большого числа проектов выявил принципиальные недоработки в нормативно-методической документации как для проектов НДВ в части обоснования целевых показателей и оценке экологического состояния водных объектов, так и в отсутствии рекомендаций по согласованному обоснованию НДС в рамках бассейновых НДВ. В действующих методических указаниях по НДВ не рассматриваются трансграничные речные бассейны, что противоречит бассейновому принципу комплексного использования и охраны водных объектов и международным обязательствам по трансграничным речным бассейнам. Для водопользователей, расположенных в пределах водохозяйственного участка, расчет НДС осуществляется на основе НДВ при соблюдении баланса загрязняющих веществ. Однако это невозможно, так как методы расчета НДВ и НДС

принципиально отличаются. Во-первых, расчет НДС в отличии от НДВ, осуществляется с учетом ассимилирующей способности водного объекта, а во-вторых, расчет НДВ для веществ двойного генезиса осуществляется на основе региональных нормативов качества вод, а расчет НДС – на основе ПДК или регионального норматива при утвержденных НДВ.

Для решения указанного выше комплекса задач авторами разработана функциональная модель. Алгоритм реализации включает следующие этапы (рис. 1).

Описание объекта и работ гидротехнического строительства с выявлением работ приводящих к загрязнению акватории и секундного выхода загрязняющих веществ

Определение места локализации работ и источников загрязнения акваторий, определение траектории движения источника загрязнения, режима сброса загрязняющих веществ

Построение математической модели конвективно-диффузионного переноса и превращения веществ (КДПиПВ) с учетом определяющих факторов для нормирования воздействия на водный объект

Оценка параметров воздействия (продолжительность воздействия, объемы загрязненной воды с различными концентрациями загрязняющих веществ, площади заиления дна и т.д.)

Обоснование водоохраных мероприятий на основе планирования, оперативного и оптимального управления показателями состава и свойств воды.



**Рисунок 1 – Функциональная модель оценки воздействия гидротехнических работ и сооружений на водные биоресурсы**

Для обеспечения защиты водного объекта от загрязнения сточными водами промышленности, коммунального хозяйства, сельскохозяйственных производств, а также поверхностным стоком застроенных территорий и промплощадок разрабатывается базисный водоохраный комплекс (БВК), а входящие в его состав технические средства охраны вод обозначаются как Um- управление. При компенсации влияния гидротехнических работ и сооружений необходимы водоохранные мероприятия, совокупность которых представляет собой компенсационный водоохраный комплекс (КВК) с учетом конструктивных и технологических параметров гидротехнических объектов (Нп), включая внутриводоемные водоохранные мероприятия, т.е. Нп- управления.

Совокупность видов различных мероприятий на водных объектах, связанных с гидротехническим строительством, базисных и компенсационных представляет собой интегральный природно-технический комплекс (ИПТК). Затраты на реализацию БВК несут отраслевые предприятия и производства, функционирующие в различных бассейнах, где осуществляется гидротехническое строительство. Стоимость КВК должна входить в сметную стоимость гидротехнического строительства, стоимость ИПТК составляет всю сумму затрачиваемую на водоохрану в рамках гидротехнического строительства в пределах ПТК.

Естественным представляется подход при котором

$$I_{\text{иптк}} = [IBVK(Um) + IKVK(Um, Hn)] \rightarrow \min, \quad (1)$$

где I- общий стоимостной функционал

Методика разработки водоохранных мероприятий при гидротехническом строительстве с другими видами воздействия предполагает комплексный подход к формированию технических средств управления качеством воды, т.е. направленные на ограничение поступления в водный объект загрязняющих примесей с водосборной площади (Um - аллохтонные), и направленные на ограничение внутриводоемного продуцирования загрязняющих примесей, интенсификацию процессов самоочищения (Нп- автохтонные). Посредством Um- управлений обеспечиваются нормативы допустимых сбросов (НДС), в рамках бассейновых нормативов допустимых воздействий (НДВ).

В состав Нп- управлений входят морфометрические и гидродинамические характеристики создаваемого или реконструируемого водного объекта, конструктивные и технологические параметры гидротехнических сооружений на нем, оказывающих влияние на процессы формирования качества воды, а также специальные водоохранные сооружения.

Система ограничений оптимизационной задачи включает требования водопользователей к качеству воды в расчетных створах. Целевой функционал обычно задает соответствие между водоохранными управлениями и стоимостью их реализации. Его минимизируют при условии соблюдения заданных ограничений, что позволяет отыскать необходимый набор технологических параметров водоохранных мероприятий, который бы обеспечил достижение лучших показателей качества воды из возможных при имеющихся асигнованиях.

В общем виде оптимизационно- имитационная модель на базе ГИС для расчета водоохранного комплекса минимальной стоимости может быть записана в виде:

$$I = [I_1(Hn) + I_2(Um) + \dots] \rightarrow \min \quad (2)$$

$$\frac{dc_i}{dx} = f_i(Hn, Um, C_j \dots) \quad (3)$$

$$C_j(0) = C_{j0}, C_j(l) = C_{jl} \quad (4)$$

$$Hn, Um \in V \quad (5)$$

В рассматриваемом случае функционал I включает стоимость водоохранных управлений (Нп), что учитывает специфику гидротехнического строительства. Векторное урав-

нение состояния системы (3) должно быть записано в форме моделей, позволяющих устанавливать зависимость формирования качества воды в водных объектах по  $j$ -ым примесям от  $U_m$  и  $H_p$ - управлений.

Это позволяет связать абиотические параметры водных экосистем, изменяющихся под воздействием гидротехнического строительства с биотическими структурно-функциональными характеристиками, ответственными за формирование качества воды.

Система ограничений оптимизационной задачи (5) отражает допустимые уровни управления, определяющие диапазон изменений  $U_m$  и  $H_p$  техническими возможностями соответствующего управления.

Выражение  $C_j$  указывает на начальные условия для каждого из рассматриваемых участков водного объекта по  $j$ - показателям качества воды. Условие  $C_j(l)$  описывают требования к качеству воды в створах водопользователей ПТК, которые принимаются с учетом бассейновых НДВ и индивидуальных для водопользователей НДС.

Экологоматематическая модель (2)-(5) позволяет решать основные задачи разработки водоохраных мероприятий при гидротехническом строительстве и других видах воздействия на водный объект. На основе решения уравнения (3) прогнозируется вектор качества воды в створах водопользования в зависимости от технических решений для ПТК-  $C_j(H_n)$ . Планирование качества воды на стадии проектирования и управления строительством и эксплуатацией гидротехнических сооружений может осуществляться при помощи соответствующих  $U_m$  и  $H_p$ - управлений. Их набор может быть определен также путем решения уравнения (3) относительно  $U_m$  и  $H_p$  при условии, что в правой части его решения в форме векторного управления будет стоять вектор нормативных требований к качеству воды.

Представленная выше функциональная модель оценки воздействия типовых гидротехнических работ с другими видами воздействия на водный объект, основывается на формировании модели выявления основных процессов загрязнения водной акватории и расчете секундного выхода загрязняющих веществ. Ключевым этапом оценки воздействия является обоснование и построение адекватных математических моделей расчета переноса загрязняющих веществ с использованием соответствующих программных средств для их решения. Предложенная функциональная модель апробирована для ряда природно-технических комплексов (ПТК) с различного типа воздействиями в водные акватории на основе созданной базы геоданных.

### **Информационно-алгоритмическое обеспечение для ГМК экологического нормирования ТПТК.**

Решение проблемы экологического нормирования техногенной нагрузки для ПТК на бассейновом уровне с использованием алгоритма и геоинформационных технологий является эффективным инструментом дифференцированного управления нагрузкой на окружающую среду от производственных комплексов различного типа. Разработана структура формирования баз геоданных для отдельного природно-технического комплекса в виде подсистем, характеристики которых организованы в виде слоев геоинформационной системы, таблиц, диаграмм, форм отчетности. Предложен алгоритм комбинированного нормирования для объективного обоснования нагрузки для каждой из рассматриваемых систем или производственных комплексов в виде ГИС проекта.

Структура информационно-алгоритмического обеспечения геоинформационной модели «ТПТК» в виде формирования проекта геоинформационной системы (ГИС) «Экологическое нормирование техногенной нагрузки» (рис.2) реализуется в графическом редакторе ModelBuilder.

Разработанное программное обеспечение для ГИС водохозяйственной системы в рамках ПТК обеспечивает функционирование в сетевом режиме с использованием всех возможных каналов связи и программную совместимость рассматриваемых территориально-разнесенных субъектов.

Структура геоинформационной моделирующей системы (ГИМС-ПТК) с соответствующим программным обеспечением позволяет реализовать широкий класс задач регионально-бассейнового нормирования техногенной нагрузки различного типа и обеспечения заданного класса качества воды (см. рисунок 3).



В соответствии с этой структурой устанавливается связь экологических НДВ с показателями деятельности отдельных предприятий, отраслей производства и групп предприятий на межотраслевом уровне с применением геоинформационного моделирующего комплекса. Для различных уровней воздействия в рамках ПТК устанавливаются территориальные, отраслевые и ресурсные нормативы экологической безопасности во временном разрезе. При текущем нормировании необходимо сочетать интересы отдельных природо-

пользователей с долгосрочными экологическими интересами бассейновых округов и временно установленными нормативами. При перспективном нормировании необходимо достижение заданных параметров к определенному сроку на основе установленных стандартов в предшествующий период действия нормативов. Перспективные нормативы переходят после установленного заранее срока в категорию текущих, т.е. рассматриваются как целевые функции осуществления природоохранной деятельности или конкретных мероприятий.



**Рисунок 3 – Структура программного комплекса ГИМС-ПТК**

Разработанный геоинформационный моделирующий комплекс представляет собой геоинформационную online-систему ПТК с реализованными моделями переноса загрязняющих веществ для разных типов водных объектов (рисунок 3). Геоинформационная моделирующая система (ГИМС) включает в себя:

блок моделирования переноса загрязняющих веществ и формирования качества воды в разветвленных водных объектах при неограниченном количестве и типе водопользователей ПТК;

пространственную тopoоснову (набор структурированных в виде отдельных слоев данных о местности) в пределах ПТК;

базу данных и банк знаний для расчета нормативов допустимого сброса (НДС);

модель водного объекта в рамках ПТС на базе программных продуктов ArcGis;

базу геоданных моделирования процессов конвективно-диффузационного переноса и превращения загрязняющих веществ (КДПиПВ);

представление данных в ГИС (отображение результатов имитационного моделирования на карте в ГИС) при разных сценариях распределения нагрузки и прогнозирования развития экологической ситуации.

Блок моделирования дает возможность создания модулей расширения сторонними разработчиками без привлечения авторов основного приложения. Модуль расширения

осуществляет самостоятельный прямой доступ к базам данных для работы со всеми основными сведениями о рассматриваемом бассейне.

Модель водного объекта в среде ГИС представлена в виде полигонов с однородными гидрологическими и морфологическими характеристиками, реализуется в соответствии с расчетной схемой водосбора и особенностей формирования качества воды. Набор программных модулей позволяет реализовать соответствующие математические модели КДП и ПВ для расчета полей концентраций при заданных краевых условиях и экспортить результат на тopoоснову. Расчетный алгоритм осуществляется методом конечных разностей, путем разбиения модели водного объекта на ячейки, в пределах которых концентрации загрязняющих веществ являются постоянными. В результате работы программного модуля формируется шейп-файл, состоящий из множества полигонов в двухмерной реализации, каждому из которых ставится в соответствие номер расчетного элемента  $mx$  и  $nu$ , записанный в таблице атрибутов. Шейп-файл необходим для занесения значений поля концентраций, получаемого в результате моделирования и построения тематических карт в среде ГИС.

Разработанный программный продукт «ГИМС-ПТК» позволяет:

квотировать и перераспределять нагрузку между водопользователями по индивидуальным НДС в рамках бассейновых НДВ.

Обосновывать возможность строительства новых предприятий и реконструкции действующих с неоднородными характеристиками в рамках ПТК.

Рассчитать процессы переноса загрязняющих веществ при фактических, чрезвычайных и плановых параметрах сброса, различных видах воздействия, а также с учетом естественных природных изменений (смена гидрологического режима).

Оптимизировать нагрузку от ряда водопользователей с целью минимизации негативного воздействия на водные ресурсы бассейна и обеспечения экологической безопасности.

### **Заключение**

На основании разработанной концепции и созданного алгоритма, методов и средств нормирования нагрузки в сложных водохозяйственных системах, предложена компоновка экологического информационно-программного комплекса в виде логической схемы взаимосвязи отдельных модулей геоинформационной моделирующей системы «ГИМС-ПТК».

В рамках «ГИМС-ПТК» учтена вся совокупность математических и логических зависимостей, адекватно отражающих основные реальные количественные и качественные взаимосвязи основных параметров ПТК в виде связи входных воздействий параметров с их выходными результатами. Особенностью предложенной «ГИМС-ПТК», в рамках разработанной концепции является достаточно полная информационная открытость с точки зрения как поддержки картографической информации и данных об основных источниках загрязнения, так и экспорта графической информации в том же формате с использованием ГИС.

Другой особенностью разработанного «ГИМС-ПТК» является возможность его применения в рамках мониторинга ПТК, так как он основывается на достаточно физически содержательной численной модели КДПиПВ, позволяющей решать как прямые задачи прогноза, так и обратные задачи не только нормирования, но и оптимального распределения всех видов воздействий. Практическая апробация выполнена для отдельных ПТК на межотраслевом уровне.