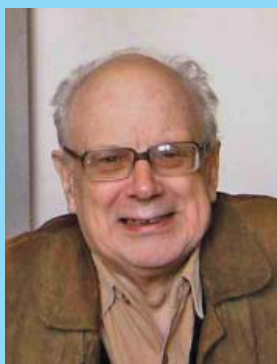


**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ
В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ ОЗЕР***© 2014 г. В.В. Меншуткин¹, Л.А. Руховец¹, Н.Н. Филатов²¹ Санкт-Петербургский экономико-математический институт Российской академии наук, Санкт-Петербург² Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук, г. Петрозаводск**Ключевые слова:** экосистемы, озера, модели, генетический алгоритм.

В.В. Меншуткин



Л.А. Руховец



Н.Н. Филатов

Представлены вопросы использования математических или имитационных моделей для решения задач оптимального управления озерными экологическими системами с целью сохранения качества воды и получения экономического эффекта от использования природных ресурсов водоема. Рассмотрены проблемы восстановления подвергшихся процессу антропогенного воздействия озер, поддержания на допустимом уровне биомассы возобновляемых ресурсов экосистемы и ее биологического разнообразия. В качестве одного из возможных математических методов решения задачи оптимизации предложено применение генетического алгоритма.

Взаимодействие человека с природными, в частности с водными, экологическими системами началось еще на самой заре развития цивилизации. Всевозможные правила и запреты в области охоты и рыболовства существовали еще со времен первобытно-общинного строя и базировались на чисто эмпирической основе [1, 2]. Во времена средневековья появились первые

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-06-00218 а.

законодательные акты об охране природных ресурсов, но идеи оптимизации носили скорее декларативный характер [3–5]. Только резкое сокращение природных ресурсов и ухудшение качества воды в период развитого капитализма заставило подойти к проблеме рационального использования природных ресурсов озер с научной точки зрения. Ярким примером такого отношения может служить процесс эвтрофикации озер и борьба с этим явлением.

Характерной чертой современных решений проблем рационального использования природных ресурсов водоемов является применение системного подхода [6]. Данный подход предполагает анализ объекта управления (в данном случае озерной экологической системы) как сложной системы. Управление (в т. ч. и оптимальное) предусматривает в той или иной форме создание математической модели этой системы.

Применение моделей при оптимизации антропогенных воздействий на водоемы

На рис. 1 представлена обобщенная схема процесса управления водными ресурсами озера [7, 8].



Ключевую позицию в этой схеме составляют модели озера и водосбора. Собственно от качества данных моделей зависит успех всего процесса управления. Эти модели, с одной стороны, создаются на основе базы фундаментальных знаний о структуре и функционировании объекта управления [9]. С другой стороны, существенную роль в создании работоспособных моделей играет мониторинг состояния озера, его водосбора, а также антропогенных и природных воздействий.

Важный подготовительный этап в процессе управления озерными экосистемами – идентификация модели. Как не были бы совершенны конструкция модели, алгоритм оптимизации, если модель не способна к отображению фундаментальных свойств управляемого объекта, рекомендации по оптимальному управлению не будут иметь практической ценности.

В самом процессе оптимизации ключевую роль играет выбор критерия оптимизации. По своей сути задача управления озерной системой многокритериальна. Действительно, в период эксплуатации озерной системы приходится удовлетворять различные, подчас противоречивого характера требования. Например, дешевизна очистных сооружений несовместима с требованием высокого качества воды для бытовых и рекреационных целей. Сильные колебания уровня воды (особенно в зарегулированных водоемах) могут войти в противоречие с требованиями увеличения промыслового вылова рыбы. Перечень подобных примеров можно продолжить.

При выработке критерия оптимизации разумно исходить из принципов устойчивого развития и понятия ассимиляционного потенциала. Для возможности сравнения разнородных величин (например, концентрации загрязняющих веществ в воде и выработки электроэнергии или выловом рыбы) целесообразно переходить на экономические понятия стоимости, оценок ущерба и штрафных санкций [10, 11].

Далее о задании внешних воздействий на управляемую озерную экосистему. Конечно, проще всего задавать неуправляемые воздействия (например, климатические) в виде постоянных во времени величин. Однако такой подход слишком груб и годится только для ориентировочных расчетов. Более реалистичным представляется выражение внешних воздействий в виде случайных величин, как это принято в климатологии. Такой подход неизбежно приводит к тому, что вся задача управления становится стохастической, даже при детерминированной модели озерной экологической системы. Это предусматривает применение метода Монте-Карло и представление результатов в виде случайных величин. Заметим, что такой подход никак не противоречит существу поставленной проблемы. Более того, можно представить себе задачу управления озерной экологической системой в терминах теории игр и рассматривать ее как «игру с природой». При таком подходе совершенно конкретный смысл получает понятие «стратегия при-

родопользования» не как набор благих пожеланий в защиту природы, а как четко определенный математический объект.

Переходя к рассмотрению самой процедуры поиска оптимального управления сложной динамической системой отметим, что этой проблеме посвящена целая отрасль математики с прочным теоретическим базисом и громадным опытом практических приложений [12]. В данной статье рассмотрен только один метод оптимизации, а именно – генетический алгоритм [13]. Этот далеко не самый распространенный и не самый эффективный метод поиска оптимального решения обладает одним несомненным достоинством, которое заключается в возможности приложения метода к объектам с негладкой и разрывной функцией отклика. Как показала практика, именно такими свойствами обладают функции отклика озерных экологических систем на те или иные антропогенные воздействия.

Поясним сказанное на конкретном примере проектирования, размещения и состава очистных сооружений на р. Варта (приток р. Одера в Польше). На основании банка данных гидрологических, гидрохимических и гидробиологических наблюдений за режимом реки с притоками за 20 лет [7] была построена модель р. Варты с небольшим водохранилищем. Была предусмотрена возможность постройки или модернизации 20 очистных сооружений, 10 небольших водохранилищ на притоках. Необходимо было определить расположение этих объектов, их мощности. Стоимости всех работ были заданы. При помощи модели и базы гидрометеорологических данных устанавливали функциональную связь между конфигурацией расположения очистных объектов и качеством воды в водохранилище. Таким образом, получили область возможных проектных решений в координатах инвестиции – качество воды.

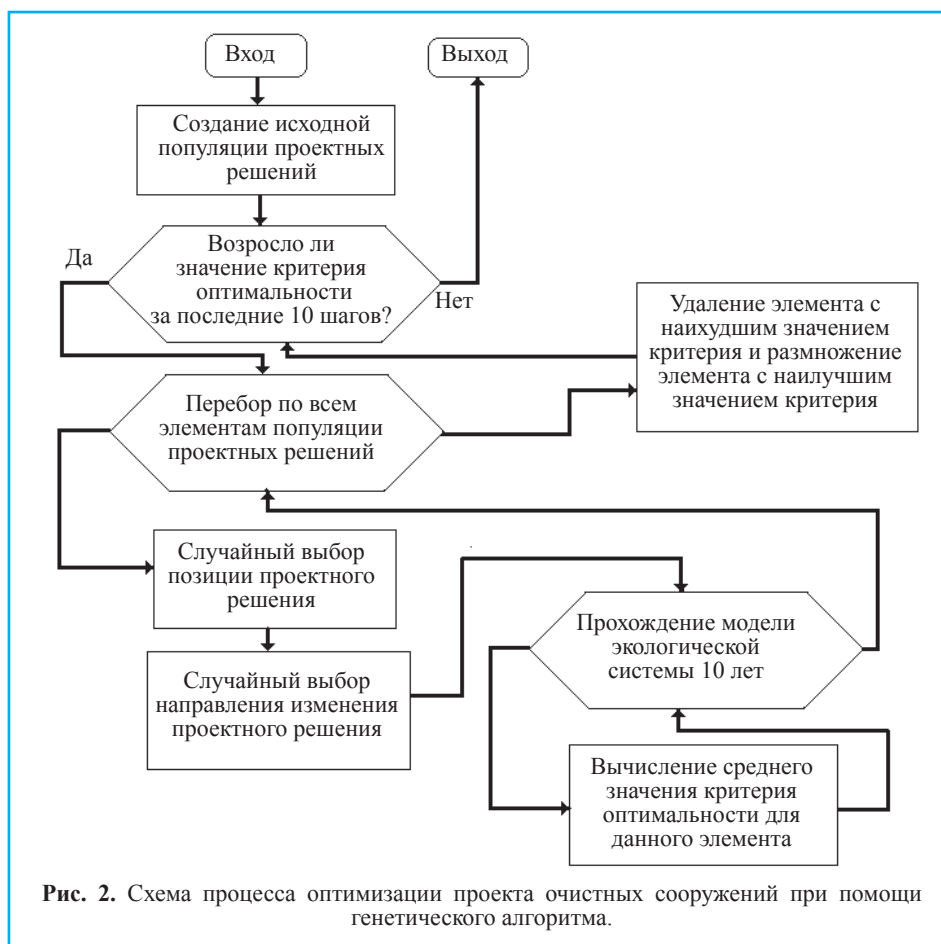
При попытке оптимизации стандартным методом градиентного спуска выяснилось, что решение получается неустойчивым: даже небольшие изменения в проектном решении приводили к резким и существенным изменениям критерия качества управления. Это связано с существенной дискретностью параметров антропогенного воздействия. Например, стоимость строительства очистных сооружений минимальна при наличии типового проекта на заданную мощность, но резко возрастает при отклонении от этого значения, так как резко увеличиваются затраты на проектирование.

Выход из создавшегося положения был найден в применении генетического алгоритма [13]. Каждое проектное решение было закодировано в виде хромосомы, причем состояние каждого гена соответствовало месту расположения очистного сооружения и его мощности согласно стандартному проекту. Аналогично кодировались и параметры небольших отстойных водохранилищ. Возможные мутации соответствовали сетке уже готовых проектных решений. Таким образом, с самого начала были выведены из

рассмотрения нестандартные проектные решения, которые резко удорожали стоимость работ и ухудшали критерий оптимальности. Такое решение было согласовано с заказчиком и принято к исполнению.

На рис. 2 приведена схема применения генетического алгоритма при оптимизации размещения и выборе мощности очистных сооружений.

Начальное состояние популяции проектных решений расположения и мощностей очистных сооружений сформировано при помощи датчика случайных чисел. На каждом шаге эволюционного процесса проводили прогон модели за 10 лет с реальными гидрометеорологическими данными. В конце каждого такого шага проводили оценку критерия оптимальности для всех вариантов проектных решений. Затем вариант, который имел минимальное значение критерия, исключался из рассмотрения (аналог гибели наименее приспособленной особи в процессе биологической эволюции). Вариант, имеющий максимальное значение критерия, получал право на размножение.



На следующем этапе оптимизации процедуры мутаций, оценки критерия, гибели и размножения проектных решений повторялись, но уже с обновленным массивом данных. Процесс оптимизации завершился в том случае, когда максимальное значение критерия не возрастало за последние 10 шагов.

Системы поддержки принятия решений по управления водными объектами

Создание компьютерных систем поддержки принятия решений (СППР) по управлению водными системами началось достаточно давно [14]. Прежде всего они создавались для управления речными системами. В состав этих компьютерных систем включались модели водных экосистем. Одна из них по управлению водной системой Ладожское озеро – р. Нева – Невская губа создавалась под руководством одного из авторов данной работы [15, 16]. Применительно к совершенствованию методов оценки состояния и прогнозирования развития водных экосистем СППР для больших стратифицированных озер может быть предназначена для решения вполне реальной задачи сохранения и улучшения состояния природных ресурсов озера. Как отмечается в [17], задачи и методы сохранения водных ресурсов больших стратифицированных озер имеют существенное отличие от небольших озер и речных систем ввиду того, что время реакции этих озер, их экосистем на внешние воздействия исчисляется десятками лет. Для таких озер, как Ладожское или Онежское – это период не менее 12 лет [18–21]. Следовательно, последствия проведенных мероприятий по регулированию водопользования, а также даже временный сброс в воду значительных количеств загрязняющих веществ или биогенов могут оказывать весьма длительные по времени воздействия на экосистему озера.

Для улучшения состояния экосистемы озера в соответствии с российскими законодательными нормами следует использовать экономические механизмы. Формирование научно обоснованных параметров экономического механизма – важная и практически значимая эколого-экономическая задача. Платежи за сброс загрязняющих и биогенных веществ (ЗВ и Б) должны стимулировать предприятия к переходу на безотходные технологии и строительство очистных сооружений. Однако эффективность этого инструмента в значительной степени определяется развитостью рыночных отношений. Как отмечается в [10], отсутствие конкурентной среды, а тем более монопольное положение на рынке позволяют производителю включать природоохранные издержки в стоимость товаров и услуг, так что расплачивается за загрязнение не производитель, а потребитель. Здесь важно отметить, что в нашей стране рынки нефтехимической, энергетической и других загрязня-

ющих отраслей существенно монополизированы, что позволяет легко перекладывать бремя платежей за загрязнение на потребителя.

Приведенные выше соображения имеют непосредственное отношение к Северо-Западному региону России и задаче сохранения его водных ресурсов. Для сохранения водных ресурсов Ладожского и Онежского озер и других больших озер умеренных широт Северного полушария, таких как Американские Великие озера, крупнейшее пресноводное озеро мира Байкал, можно выделить три первоочередные задачи:

- определение уровня допустимой антропогенной нагрузки по основным ингредиентам (ЗВ и Б);
- установление научно-обоснованных значений параметров, определяющих регламенты водопользования для данного водоема (нормативы и лимиты на сброс ЗВ и Б, ставки платежей за сброс ЗВ и Б, ставки платежей за водозабор и водосброс);
- создание интегрированных систем управления водопользованием, обеспечивающих информационную поддержку органов природоохраны (структур Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, соответствующих органов власти субъектов РФ и т. п.) при принятии решений, влияющих на состояние водных объектов, могущих оказать содействие в решении научных и практических задач по согласованию интересов развития экономики региона с интересами природоохраны и населения, по обеспечению качества среды обитания; систем, обеспечивающих возможность моделирования и прогнозирования последствий принимаемых решений [14].

Решить эти задачи возможно с помощью математических моделей. Первая из задач состоит в получении оценок ассимиляционного потенциала для озер по сбросу загрязняющих веществ и биогенов [10]. Подходы к решению второй задачи предложены в [13], опыт создания СППР представлен в [14, 15]. Новое решение задачи управления озерными экосистемами заключается в применении генетического алгоритма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Менишуткин В.В. Искусство моделирования (экология, физиология, эволюция). Петрозаводск–Санкт-Петербург. 2010. 419 с.
2. Одум Ю. Экология. М.: Мир, 1986. Т. 1. 328 с.; Т. 2. 376 с.
3. Быков А.А. Моделирование природоохранной деятельности. Изд. НУИЦ, Госкомэкология. 1998. 182 с.
4. Новосельцев В.Н. Теория управления и биосистемы. М. 1978. 320 с.
5. Реймерс Н.Ф. Экология. Теория, законы, правила, принципы и гипотезы. М. 1994. 360 с.
6. Левич А.П. Искусство и метод моделирования экосистем. Вариационные методы в экологии, структурные и экстремальные принципы, категории и функторы. М.; Ижевск. 2012. 728 с.

7. Менишуткин В.В. Оптимальное управление экологической системой озера или водохранилища с целью получения наибольшей экологической выгоды от эксплуатации природных ресурсов водоема. СПб.: ЭМИ РАН, 2005. 72 с.
8. Абакумов А.Н. Математическое моделирование водных экосистем: история, проблемы, перспективы. Владивосток. 2007. 33 с.
9. Jorgensen S.E. Fundamentals of ecological modelling. Elsevier Pub. House. 1994. P. 450.
10. Гусев А.А., Гусева И.Г. Об экономическом механизме экологически устойчивого развития // Экономика и мат. методы. 1996. Т. 32. № 2. С. 67–76.
11. Кречетов Л.И. Системы экономического стимулирования водоохранной деятельности предприятий. II: рыночные системы // Водные ресурсы. 1991. № 5. С. 174–184.
12. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М. 1961. 266 с.
13. Курейчик В.М. Генетические алгоритмы и их применение. Таганрог: Изд. ТРТУ, 2002. 177 с.
14. Интегрированное управление водными ресурсами Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Опыт создания системы поддержки принятия решений / под ред. А.Ф. Алимова, Л.А. Руховца и М.М. Степанова. СПб.: СПб НЦ РАН, 2001. 420 с.
15. Невская губа – опыт моделирования / под ред. В.В. Менишуткина. СПб.: СПб НЦ РАН, 1997. 375 с.
16. Руховец Л.А., Астраханцев Г.П., Гусева В.Н., Минина Т.Р., Полосков В.Н. Управление водопользованием и проблема сохранения водных ресурсов больших стратифицированных озер // Сб. науч. тр. «Стратегические проблемы водопользования России» / Ин-т водных проблем РАН; СевКавНИИВХ. Новочеркасск: НОК, 2008. С. 101–110.
17. Астраханцев Г.П., Менишуткин В.В., Петрова Н.А., Руховец Л.А. Моделирование экосистем больших стратифицированных озер / под ред. Л.А. Руховца. СПб.: Наука, 2003. 364 с.
18. Менишуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н. Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор). 1. Гидродинамика озер // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 6. С. 1–17.
19. Rukhovets L. and Filatov N. (Eds). Ladoga and Onego – Great European Lakes // Observations and Modelling. Springer-Praxis. 2010. 320 p.
20. Руховец Л.А., Петрова Н.А., Менишуткин В.В., Астраханцев Г.П., Минина Т.Р., Полозков В.Н., Петрова Т.Н., Сусарева О.М. Исследование реакции экосистемы Ладожского озера на снижение фосфорной нагрузки // Водные ресурсы. 2011. Т. 38. № 6. С. 740–752.
21. Менишуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н. Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор). 2. Модели экосистем // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 1. С. 24–38.

Сведения об авторах:

Менишуткин Владимир Васильевич, д-р биол. наук, профессор, главный научный сотрудник, ФГБУН Санкт-Петербургский экономико-математический институт Российской академии наук, 191187, Санкт-Петербург, ул. Чайковского, 1; e-mail: leog@emi.nw.ru

Руховец Леонид Айзикович, д-р физ.-мат. наук, профессор, директор, Санкт-Петербургский экономико-математический институт Российской академии наук.

Филатов Николай Николаевич, советник Российской академии наук, чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник, ФГБУН Институт водных проблем Севера Российской академии наук, 185030, Республика Карелия, г. Петрозаводск, просп. Александра Невского, 50; e-mail: nfilatov@nwpi.krc.karelia.ru