

УДК 330.15  
ББК 65.28

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ЭКОСИСТЕМ БОЛЬШИХ ОЗЕР ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОЦЕНОК АССИМИЛЯЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА**

**Астраханцев Г. П.<sup>1</sup>, Меншуткин В. В.<sup>2</sup>, Минина Т. Р.<sup>3</sup>**  
(ФГБУН Санкт-Петербургский экономико-  
математический институт РАН, Санкт-Петербург)

*Комплекс математического моделирования озерных экосистем (на примере Ладожского и Онежского озер) под руководством д.ф.-м.н., профессора Л.А. Руховца создавался более 25 лет. Результаты опубликованы в отечественных и зарубежных журналах и монографиях. Разработка экономических механизмов управления водопользованием для больших стратифицированных озер – продолжение этих исследований. В статье рассмотрены возможности использования комплекса моделей для количественных и экономических оценок ассимиляционного потенциала экосистем крупнейших пресноводных водоемов.*

Ключевые слова: экономическая оценка; экосистемы озер; ассимиляционный потенциал; водные ресурсы; рациональное природопользование.

---

<sup>1</sup> Геннадий Петрович Астраханцев, доктор физико-математических наук, профессор ([astr@emi.nw.ru](mailto:astr@emi.nw.ru); [astrg@mail.ru](mailto:astrg@mail.ru)).

<sup>2</sup> Владимир Васильевич Меншуткин, доктор биологических наук, профессор ([vvt@emi.nw.ru](mailto:vvt@emi.nw.ru)).

<sup>3</sup> Татьяна Ростиславовна Минина, кандидат технических наук ([minina@emi.nw.ru](mailto:minina@emi.nw.ru); [trminina@yandex.ru](mailto:trminina@yandex.ru)).

## **1. Использование моделей для решения задач сохранения водных ресурсов**

Одним из важнейших факторов сохранения самой биосферы и обеспечения её устойчивости является ассимиляционный потенциал (АП) природной среды. АП природной среды – это ее самовосстановительная способность по отношению к поступлению в природную среду вещества и энергии в результате хозяйственной деятельности. Фактически АП является свойством экологических систем «сопротивляться» внешним воздействиям. Термин АП как природный ресурс в отечественной литературе эколого-экономической тематики появился в работах сотрудников Института проблем рынка [4, 6].

АП природной среды является едва ли не важнейшей частью национального богатства каждой страны [17]. Следует подчеркнуть, что АП природной среды России является одним из весьма значимых факторов поддержания устойчивости всей биосферы [14], так как огромная территория, значительная часть которой покрыта лесом и другой растительностью, играет важную роль в депонировании парниковых газов на планете.

АП представляет собой особый вид природного ресурса и как ограниченный природный ресурс нуждается в экономической оценке. Экономическая оценка АП важна как сама по себе, так и в рамках общей оценки национального богатства России [6].

Задача экономической оценки АП многоаспектна. Использование АП, как и других природных ресурсов, обуславливает возникновение ренты. В этой связи важными являются права собственности на данный природный ресурс, т.е. на АП. Поскольку АП – национальное достояние, то собственником логично должна быть РФ, а распоряжение может быть передано в регионы [6].

Для получения экономической оценки АП необходимо измерить его количественно. Таким образом, возникает задача количественного измерения АП. Сложность измерения АП способствует широкомасштабному нерациональному использованию этого природного ресурса. Отсутствие количественной оценки АП фактически не позволяло ввести институт собствен-

ности на этот природный ресурс. В такой ситуации «пользователи» АП (например, те, кто сбрасывает загрязняющие вещества в водоём) фактически присваивают АП. Это приводит к неконтролируемому поступлению загрязнений в окружающую среду, что может создать угрозу превращения АП из возобновляемого ресурса в невозобновляемый [6, 17].

В рамках задачи экономической оценки АП природной среды мы рассмотрим важную задачу экономической оценки АП экосистем крупнейших пресноводных озер. Хорошо известно, что состояние озера и качество воды в нем в самой большой степени определяется состоянием его экосистемы. По этой причине задача сохранения водных ресурсов водоема равнозначна задаче сохранения «здоровья» экосистемы водоема. Рассмотрим проблемы сохранения водных ресурсов великих озер на основе объединения экологического и экономического подхода к решению проблемы.

Применительно к водным ресурсам АП локализован по водным объектам. В качестве количественной оценки представляется естественным принять систему лимитов (по ингредиентам) на объемы сброса загрязняющих веществ и биогенов (ЗВ и Б), соблюдение которых сохраняет устойчивость водных экосистем озер. Задача определения этих лимитов достаточно сложна. Для её решения требуется разнообразная информация о водных объектах и необходимы модели гидротермодинамики и модели экосистем. Здесь ещё уместно отметить, что желательно для получения количественной оценки АП использовать модель сукцессии фитопланктона. Дело в том, что получение количественной оценки состоит в проведении вычислительных экспериментов при различных уровнях нагрузки по ингредиентам. Фактически для каждого из ингредиентов в вычислительных экспериментах воспроизводится круглогодичное функционирование экосистемы и в качестве количественной оценки выбираются такие величины максимальные значения ингредиентов, при которых состояние экосистемы озера оценивается как олиготрофное. Иначе говоря, количественные оценки АП представляют собой границы допустимой антропогенной нагрузки, позволяющей сохранять озеро в олиготрофном состоянии. На

практике задача снижения антропогенной нагрузки может оказаться экономически неразрешимой из-за огромных затрат на соответствующие мероприятия, поэтому в качестве допустимых значений антропогенной нагрузки могут быть взяты величины, при которых озеро находится в слабо мезотрофном состоянии. Подчеркнем ещё раз, что для получения допустимых значений антропогенной нагрузки необходимо использовать модели гидротермодинамики и модели экосистем озер.

Следует отметить, что большие озера обладают способностью ассимилировать весьма значительные количества загрязняющих веществ и биогенов без ущерба для устойчивого состояния своих экосистем. Рассмотрим проблему получения оценок АП на примере Ладожского и Онежского озер.

## **2. Количественная оценка АП<sup>1</sup>**

Как уже отмечалось, не избежало развития процесса антропогенного эвтрофирования одно из самых северных среди великих озер мира – Ладожское озеро. Ладожское озеро – одно из самых изученных озер мира. Для него имеются многолетние ряды наблюдений за состоянием экосистемы озера и за антропогенной нагрузкой [12–13]. Это позволило лимнологам выделить в составе антропогенной нагрузки основные ингредиенты, определяющие в значительной степени возможные изменения в состоянии экосистемы озера. Выбор в первую очередь биогенов для оценки АП по их сбросу в озера объясняется ролью биогенов в функционировании экосистем. Избыток биогенов, особен-

---

<sup>1</sup> *Неэкономическая оценка АП Ладожского озера проводилась следующим образом. Рассматривается нагрузка, распределенная по озеру как по пространству, так и по времени в течение года, более или менее близкая к реальности. Далее с помощью комплекса моделей строится периодическое решение описания состояния экосистемы. Счет ведется как минимум на 15 лет, в течение которых, как следует из вычислительных экспериментов, складывается периодический круглогодичный режим. Для сокращения времени счета в моделях предусмотрено агрегирование сетки для первых лет и согласованный переход далее на более подробную сетку.*

но избыток фосфора, привел Ладожское озеро к началу 60-х годов на грань перехода из мезотрофного состояния в эвтрофное [13]. По этой причине снижение фосфорной нагрузки – это одна из важнейших задач для сохранения его водных ресурсов, в том числе и для Онежского озера. Следует отметить, что процесс антропогенного эвтрофирования Онежского озера находится в начальной стадии.

В ходе исследования процесса антропогенного эвтрофирования Ладожского озера сотрудниками Института озероведения РАН была поставлена задача об определении уровня допустимой биогенной, прежде всего фосфорной, нагрузки. Было определено, что нагрузка на уровне  $4000 \text{ т } P_{\text{total}}/\text{год}$  может быть принята за допустимую [19]. С помощью модели В.В. Меншуткин и О.Н. Воробьева [15] показали, что при нагрузке, равной  $4000 \text{ т } P_{\text{total}}/\text{год}$ , Ладожское озеро сохраняется в слабо мезотрофном состоянии. В этой связи нагрузка на уровне  $4000 \text{ т } P/\text{год}$  была определена как приемлемая. В последующих работах [2, 22] эти результаты были подтверждены. Здесь уместно отметить, что фосфорная нагрузка на Ладожское озеро до начала процесса антропогенного эвтрофирования в 1962 году составляла  $2430 \text{ т } P_{\text{total}}/\text{год}$ . При этой нагрузке озеро находилось в олиготрофном состоянии.

В вычислительных экспериментах с помощью модели сукцессии фитопланктона была получена оценка АП по сбросу фосфора для Ладожского озера, равная  $2500 \text{ т } P_{\text{total}}/\text{год}$  [23]. Для Онежского озера с помощью модели, в которой присутствуют два биогена – азот и фосфор, получены оценки АП по сбросу фосфора –  $800 \text{ т } P_{\text{total}}/\text{год}$  и по сбросу азота –  $15000 \text{ т } N_{\text{total}}/\text{год}$  [28].

### **3. Об экономической оценке АП**

Поскольку вопрос о получении экономических оценок для АП выходит, в принципе, за пределы рассмотрений данной работы, наши рассуждения по этой тематике будут сформулированы с возможными разъяснениями. Здесь также уместно отметить, что существуют подходы к получению экономических оценок АП, в которых наряду с экономико-математическими моделями используются модели экосистем озер [2, 7, 23].

Чтобы получить экономические оценки АП, определим, что будем понимать под экономической оценкой. Для каждого ЗВ и/или Б экономическую оценку определим как минимальный размер платежа за сброс 1 т ЗВ и/или Б при условии, что суммарное поступление в водоем данного ингредиента не превышает количественной оценки АП экосистемы озера по этому ингредиенту и при этом каждое предприятие, сбрасывающее ЗВ и/или Б в озеро, оптимизировало свою прибыль при заданных экономических и экологических ограничениях.

Для получения экономической оценки предложен новый итерационный алгоритм, основанный на использовании созданной авторами ранее экономико-математической модели функционирования предприятия-водопользователя. Алгоритм позволяет «методом проб и ошибок» получить экономическую оценку АП по каждому ЗВ и Б.

Этот алгоритм состоит в следующем [24]:

- 1) эксперт (или орган, принимающий решение) устанавливает лимиты на сброс ЗВ и Б отдельно для каждого предприятия на водосборе озера и единые ставки платежей за сброс 1 т ЗВ и Б;
- 2) с помощью экономико-математической модели для каждого предприятия при заданных лимитах и ставках платежей путем решения оптимизационной задачи определяются объемы сброса ЗВ и Б и, следовательно, в итоге определяется общая антропогенная нагрузка на водоем по выделенному набору ингредиентов;
- 3) если нагрузка на водоем по некоторым ингредиентам превосходит количественные оценки АП, ставки платежей увеличиваются и процесс продолжается;
- 4) если по всем ингредиентам нагрузка не превосходит количественной оценки АП, то ставки платежей уменьшаются и процесс продолжается;
- 5) правило окончания процесса представляется очевидным.

Основой этого алгоритма служит экономико-математическая модель предприятия водопользователя. В подобных моделях функционирование предприятий описывается с помощью так называемых производственных функций [10]. Такие модели позволяют решить задачу оптимизации прибыли

предприятия при заданных регламентах водопользования (лимитах на сброс, ставках платежей за сброс, нормативах на концентрации ЗВ и Б) и известных технологических ограничениях (объемы и концентрации ЗВ и Б на единицу выпускаемой продукции). Результатом решения задачи оптимизации, в частности, будут объемы сброса ЗВ и Б. Предложенный алгоритм позволяет определить такие минимальные ставки платежей, при которых объемы сброса всей совокупности предприятий-водопользователей данного водоема или не превышают установленные количественные оценки АП по всей совокупности ЗВ и Б, или не превышают величин, которые экономически и социально приемлемы в качестве оценок АП на момент получения оценок.

Фосфорная нагрузка на Ладожское озеро в период 1996–2005 гг. составляла в среднем 3580 т Р/год. В период 2006–2011 гг. поступление фосфора в Ладожское озеро с речным притоком составляет 3000–5000 т Р/год в зависимости от водности года [21]. В этой работе приводятся данные, согласно которым озеро продолжает находиться в слабо мезотрофном состоянии.

Проведенные нами вычислительные эксперименты показали, что для ограничения сброса фосфора в Ладожское озеро до уровня, не превышающего АП, необходимо увеличить ставки платежей по сравнению с данными из [11] не менее чем на порядок [24]. Возможен, вероятно, другой подход к получению экономической оценки АП, основанный на моделировании экономической деятельности на всей территории водосбора озера. К сожалению, этот подход трудно реализуем, так как для его реализации необходима информация о функционировании всей совокупности предприятий водосбора, хотя бы при агрегировании в отраслевом разрезе [23].

Наконец, возможен подход к оценке АП, основанный на таком рыночном механизме, как продажа на аукционах разрешений (квот) на сброс ЗВ и Б, подобно тому, как это делается с квотами на выбросы парниковых газов. Все эти подходы позволяют согласовывать экономические интересы предприятий-водопользователей с интересами уполномоченного государ-

ством органа по охране природной среды в тех случаях, когда использование полученных количественных оценок АП не представляется возможным по соображениям экономического или социального характера.

Вкратце опишем механизм торговли квотами на выброс загрязняющих веществ (ЗВ) для решения природоохранных проблем сохранения экологии глубоководных озер (Ладожского озера) в сочетании с экономикой региона. Рассматриваемый рынок является по сути дела монополистическим (один продавец, много покупателей). Объединение администраций региона на основе полученной оценки ассимиляционного потенциала (АП) предлагает на один год предприятиям водопользователям подать функции предложений на аукцион. Одновременно и независимо они сообщают аукционеру свою заявку: квоты на количество разных загрязняющих веществ и цены за единицу загрязняющего вещества. По некоторым правилам (модель аукциона) происходит аукцион, в результате которого вырабатывается равновесная цена для данного ЗВ, одинаковая для всех предприятий. При некоторых принципах рационирования тем самым осуществляется баланс между спросом (величиной ассимиляционного потенциала) и предложениями. Задача аукциона – получение максимальной прибыли.

Это основная часть моделирования. Предполагаем, что предприятия подавали заявки, решая свою проблему получения максимальной чистой прибыли. Привлекая ранее созданные нами модели поведения предприятий в зависимости от многих параметров (в частности от расходов на очистку), можно усложнять моделирование в следующем направлении: учитывая произведенный за год ущерб экономики региона. Для этого вводится понятие дохода региона. Под доходом региона имеется в виду сумма дохода аукционера и всех выигрышей предприятий-водопользователей. При этом под выигрышем предприятия понимается разность между доходом предприятия, полученным при назначенных аукционером ценах и квотах, и доходом, ожидавшимся предприятием при подаче заявки, т.е. в некотором смысле нереализованный доход года. Такое расширение моделирования позволяет формировать состояние региона с учетом

равновесной цены по Нэшу (цена, при которой доход региона максимизируется при всевозможных результатах аукциона).

Это равновесное состояние можно найти при эволюционном моделировании. Для этого, считая, что известны производственные функции предприятий, можно вводить на следующий год некоторые изменения (рационарование правил аукциона) в проведении аукционов, для того чтобы достичь равновесное состояние Нэша. При этом заметим, что допускается усложнение рынка: разрешается торговля нереализованными частями полученных квот прошлого года – рынок перестает быть монополистическим.

Таким образом, модель рыночных отношений позволяет получить экономическую оценку ассимиляционного потенциала, оценить отклонения заявочных предложений от результатов аукциона, исследовать изменение равновесных состояний Нэша в зависимости от формы проведения аукциона.

#### **4. О возможности «оздоровления» состояния экосистемы Ладожского озера**

Как уже отмечалось, с начала 60-х годов Ладожское озеро подверглось антропогенному эвтрофированию из-за роста фосфорной нагрузки [1], которая к началу 80-х годов выросла почти в 3,5 раза от 2430 т Р/год до 8100 т Р/год. Принятые меры привели к снижению фосфорной нагрузки, составившей в период 1984–1995 гг. в среднем 6040 т Р/год, а в следующий период 1996–2005 гг. она составила 3580 т Р/год. Здесь приведены данные из работ [12, 16, 19, 20].

Снижение фосфорной нагрузки привело к 1995 году к некоторому улучшению состояния экосистемы озера. При этом в соответствии со снижением фосфорной нагрузки несколько снизилась и продукция фитопланктона. Однако в работе Н.А. Петровой с соавторами [16] было отмечено, что дальнейшее существенное снижение фосфорной нагрузки после 1995 года не привело, вопреки ожиданиям, к снижению продукции фитопланктона. При этом фактически оказалось, что изменение среднелетних значений биомассы в период 1996–2005 гг.

практически находится в тех же пределах, что и ее изменения в предыдущий период 1984–1995 гг. [20], когда фосфорная нагрузка была существенно выше.

Объяснению этого явления, основанному на анализе данных наблюдений, как раз и посвящена работа [16]. Одной из основных причин указанного явления Н.А. Петрова и ее соавторы считали увеличение скорости внутриводоемного оборота фосфора, которое авторы работы связывали с увеличением численности бактериопланктона и водных грибов (организмов-деструкторов). Соглашаясь в целом с их аргументацией, нельзя не отметить, что доказательство справедливости предложенных интерпретаций и выводов не во всех частях подтверждено результатами прямых измерений. Дело в том, что основанные на данных наблюдений количественные оценки для огромного озера по многим причинам весьма приблизительные.

В этой связи с помощью методов математического моделирования в уже упомянутой работах [25–27] воспроизведен механизм ускорения внутриводоемного оборота фосфора и получены результаты, объясняющие фактический ход трансформации экосистемы Ладожского озера. Для воспроизведения круглогодичного функционирования экосистемы Ладожского озера использовалась модель сукцессии фитопланктона [2, 29].

Для того чтобы ускорить круговорот фосфора в рамках модели, авторы изменили блок, описывающий процесс деструкции детрита и растворенного в воде органического вещества. Как известно, основными деструкторами в экосистеме озера являются бактериопланктон и водные грибы. В модели они не представлены. Деструкция в блоке описывается уравнениями для детрита  $DP$ , для растворенного в воде органического вещества  $DOP$  и для минерального фосфора. В модели, как и в природе, детрит разлагается на две субстанции: растворенный в воде минеральный фосфор и растворенное в воде органическое вещество. Эта трансформация регулируется двумя разными функциями от температуры воды. Регенерация минерального фосфора из растворенного органического вещества представлена в модели предельно простой линейной зависимостью. Изме-

нения коэффициентов в конструкции блока были выбраны в ходе вычислительных экспериментов [27].

Вычислительные эксперименты состояли в воспроизведении круглогодичного функционирования экосистемы Ладожского озера с помощью модели сукцессии как со «старым» блоком деструкции, так и с «новым» при двух вариантах фосфорной нагрузки: 2430 т P/год и 4000 т P/год.

Основной результат этих расчетов: при «новых» коэффициентах деструкции биомасса суммарного фитопланктона выше, чем при «старых» коэффициентах для обеих нагрузок. Объяснение этого явления основано на том, что при «новых» коэффициентах деструкции концентрация *DOP* в эпилимнионе (приповерхностной части водного тела озера) уменьшилась при обеих нагрузках. Это же имеет место для детрита. Таким образом, происходит перераспределение потоков фосфора внутри экосистемы: для развития фитопланктона дополнительное количество растворенного в воде минерального фосфора высвобождается за счет ускорения деструкции растворенного в воде органического вещества *DOP* и детрита *DP*. При этом *DOP* – это наиболее консервативная фракция в воде озера, включающая фосфор глинистых комплексов.

Здесь уместно подчеркнуть, что результаты моделирования подтверждают заключение работы [16] о вовлечении во внутриозерный круговорот значительной части растворенного в воде органического вещества *DOP*.

Достоверность проведенных вычислительных экспериментов можно было бы поставить под сомнение, если бы в дискретной модели не выполнялся точно закон сохранения (изменения) для общего фосфора. Наличие у дискретной модели такого фундаментального свойства гарантирует то, что общее количество используемого фосфора определяется только обменом через границы водоема и тем, что внутри водного тела нет ложных источников и стоков вещества.

Результаты моделирования позволяют сделать вывод, что изменился АП экосистемы озера по сбросу фосфора. Для получения ответа на вопрос, насколько изменился АП по сбросу фосфора, были проведены вычислительные эксперименты по

модели сукцессии как со «старым» блоком деструкции, так и с «новым» [27]. Рассматривалась годовая динамика сырой биомассы суммарного фитопланктона при четырех нагрузках 4000 т Р/год, 2430 т Р/год, 1800 т Р/год и 1500 т Р/год по модели с «новым» блоком деструкции и по её прежней версии. Максимальное значение сырой биомассы при нагрузке 2430 т Р/год приблизительно равно 1,2 мг/л. Примерно такую же величину составляет максимальное значение биомассы при нагрузке 1800 т Р/год. При этом следует ещё отметить, что среднегодовое значение биомассы при нагрузке 1800 т Р/год превышает среднегодовое значение биомассы при нагрузке 2430 т Р/год. Это означает, что АП по сбросу фосфора в Ладожское озеро снизился не менее чем на четверть (на 630 т Р/год). Отметим ещё, что при нагрузке 4000 т Р/год до изменения роли организмов-деструкторов в экосистеме максимальные значения биомассы не превышали 2 мг/л, тогда как при нагрузке 4000 т Р/год максимальное значение больше примерно на 15%, и ещё больше среднегодовое значение. Как показывают эксперименты в работе [27], при нагрузке 4000 т Р/год уже не представляется возможным считать, что озеро находится в слабо мезотрофном состоянии.

Таким образом, нами получена новая оценка АП по сбросу фосфора в Ладожское озеро, равная 1800 т Р/год. Это означает, что только снижение нагрузки до этого уровня возвратит озеро в олиготрофное состояние. Однако, несмотря на определенную условность проведенных расчетов, реально вернуть озеро в олиготрофное состояние представляется невозможным. Дело в том, что по литературным данным в настоящее время естественная фосфорная нагрузка на Ладожское озеро находится в пределах 2000–2200 т Р/год. Это означает, что снижение нагрузки до уровня АП, т.е. ниже уровня естественной нагрузки, экономически нереализуемо.

Подводя итог разделу о возможности «оздоровления» больших стратифицированных озер, подвергшихся антропогенному эвтрофированию, приходится признать такую возможность маловероятной.

Проблема «оздоровления» озер непосредственно связана с проблемой устойчивого развития. Во многих работах, посвященных проблемам сохранения природной среды (ландшафтов, лесов, водных объектов суши, мирового океана, тундры и т.д.), распространены представления о том, что снижение антропогенной нагрузки является универсальным средством сохранения и восстановления состояния природной среды, имевшего место в период естественного развития. Анализ многих предложений по переходу к устойчивому развитию показывает, что они исходят из таких же предположений, что снижение антропогенной нагрузки обеспечит улучшение или стабилизацию состояния природной среды. Проведенные нами исследования показывают, что этого может не быть для великих озер мира умеренных широт северного полушария, к числу которых принадлежит Ладожское озеро.

В заключение отметим, что снижение АП по сбросу фосфора, если учесть, что в принципе АП является возобновляемым природным ресурсом, приводит к ежегодным экономическим потерям. Следует также отметить, что:

- измерение АП необходимо для определения регламентов водопользования (определения лимитов на сброс ЗВ и Б);
- предложенные алгоритмы определения размеров платежей за сброс загрязнений могут быть использованы для установления регламентов водопользования, обеспечивающих сохранение водных ресурсов;
- снижение антропогенной нагрузки остается важной задачей водопользования, однако для снижения существует естественная нижняя граница. Попытки же повышения степени очистки ведут к росту затрат;
- одной из важнейших задач сохранения водных ресурсов является создание интегрированных систем управления водопользованием, обеспечивающих информационную поддержку органов природоохраны (структур Министерства природных ресурсов РФ, соответствующих структур органов власти субъектов РФ и т.п.) при принятии решений, влияющих на состояние водных объектов, созданных систем, 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 [8–9].

### **Литература**

1. *Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера* / Под ред. Н.А. Петровой. – Л.: Наука, Ленинградское отделение. 1982. – 304 с.
2. АСТРАХАНЦЕВ Г.П., МЕНШУТКИН В.В., ПЕТРОВА Н.А. И ДР. *Моделирование экосистем больших стратифицированных озер*. – СПб.: Наука. 2003. – 363 с.
3. ВОЛОСАСТОВ С.Э., ГУСЕВА В.Н., СЕМЕНЦОВ В.И. И ДР. *Моделирование эколого-экономических взаимодействий в задачах интегрированного управления водными ресурсами региона* // Интегрированное управление водными ресурсами: математические модели и информационные технологии. Часть 1. Препринт [под ред. Л.А. Руховца]. – СПб.: Нестор-История, СПб ЭМИ РАН, 2007. – С. 28–48.
4. ГОФМАН К.Г., РЮМИНА Е.В. *«Кредитные отношения» общества и природы* // Экономика и математические методы. – 1994. – Т. 30. – Вып. 2. – С. 17–32.
5. ГУСЕВ А.А. *Ассимиляционный потенциал окружающей среды в системе прав собственности на природные ресурсы* // Экономика и математические методы. – 1997. – Т. 33 – №3. – С. 5–15.
6. ГУСЕВ А.А. *Современные экономические проблемы природопользования*. – М.: Международные отношения, 2004. – 208 с.
7. ГУСЕВ А.А., МОТКИН Г.А., РЮМИНА Е.В. *Экологические императивы экономической стратегии* // В «Россия в глобализирующемся мире: Политико-экономические очерки» [под ред. Д.С.Львова]. – М.: Наука. 2004. – 740 с.
8. *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 Научный центр РАН, 2001. – 420 с.
9. *Интегрированное управление водными ресурсами: математические модели и информационные технологии.* – Часть 1. Препринт / Под ред. Л.А. Руховца. – СПб.: Нестор-История, СПб ЭМИ РАН, 2007. – 63 с.
  10. КЛЕЙНЕР Г.Б. *Производственные функции.* – М.: Финансы и статистика, 1986. – 239 с.
  11. КОЧАРЯН А.Г., САФРОНОВ К.И. И ДР. *Охрана водных ресурсов в России от загрязнений: современное состояние и перспективы* // Инженерная экология. – 2006. – №4. – С. 3–16.
  12. *Ладожское озеро – критерии состояния экосистемы* / Под ред. Н.А. Петровой, А.Ю. Тержевика. – СПб.: Наука, 1992. – 326 с.
  13. *Ладожское озеро – прошлое, настоящее и будущее* / Под ред. В.А. Румянцева. В.Г. Дробковой. – СПб.: Наука, 2002. – 327 с.
  14. ЛЬВОВ Д.С. *Экономика и жизненный мир человека* // Российская газета. – 2006. – №105 от 19 мая 2006. – С. 21.
  15. МЕНШУТКИН В.В., ВОРОБЬЕВА О.Н. *Модель экосистемы Ладожского озера* // Современное состояние экосистемы Ладожского озера. – Л.: Наука, Ленинградское отделение, 1987. – С. 187–200.
  16. ПЕТРОВА Н.А., ИОФИНА И.В., КАПУСТИНА Л.Л. И ДР. *Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера (этапы трансформации экосистемы, 1975–2004 гг.)* // Экологическая химия. – 2005. – Т. 14. – Вып. 4. – С. 209–234.
  17. *Путь России в XXI век* / Под ред. Д.С. Львова. – М.: Экономика, 1999. – 794 с.
  18. РАСПЛЕТИНА Г.Ф., ГУСАКОВ Б.Л. *Применение прямого и косвенного метода расчета биогенной нагрузки и концентрации веществ в воде Ладожского озера* // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера. – Л.: Наука, 1982. – С. 222–242.
  19. РАСПЛЕТИНА Г.Ф., СУСАРЕВА О.М. *Физико-географическая и экономико-географическая характери-*

- стика водосборного бассейна Ладожского озера // Оценка экологического состояния рек бассейна Ладожского озера по гидрохимическим показателям и структуре гидробиоценозов. – СПб.: ИНОЗ РАН, 2006. – С. 6–11.*
20. РУМЯНЦЕВ В.А., ДРАБКОВА В.Г. *Экологическая диагностика состояния Ладожского озера // Водные ресурсы Европейского Севера России. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. – С. 110–126.*
  21. РУМЯНЦЕВ В.А., КОНДРАТЬЕВ С.А., ПОЗДНЯКОВ Ш.Р. И ДР. *Основные факторы, определяющие функционирование водной системы Ладожское озеро – река Нева – Невская губа – восточная часть Финского залива в современных условиях // Известия РГО. – СПб.: Наука, 2012. – Т. 144. – Вып. 2. – С. 55–69.*
  22. РУХОВЕЦ Л.А., АСТРАХАНЦЕВ Г.П., АНДРЕЕВ В.А. *Водные ресурсы и устойчивое развитие (региональный аспект) // Экономико-математические исследования: математические модели и информационные технологии. V. Анализ процессов глобализации [под ред. А.А. Корбута, С.Л. Печерского и Л.А. Руховца]. – 2006. – С. 134–176.*
  23. РУХОВЕЦ Л.А., АСТРАХАНЦЕВ Г.П., МИНИНА Т.Р. И ДР. *Оценка возможных изменений в экосистеме Ладожского озера в 21 веке под влиянием антропогенных и климатических факторов // Водные ресурсы. – 2006. – Т. 33. – №3. – С. 367–382.*
  24. РУХОВЕЦ Л.А., ГУСЕВА В.Н., АСТРАХАНЦЕВ Г.П. И ДР. *Использование рыночных механизмов сохранения водных ресурсов Великих озер Европы // Экономико-математические исследования: математические модели и информационные технологии. VI. – 2007. – СПб.: Нестор-история. – С. 295–310.*
  25. РУХОВЕЦ Л.А., ПЕТРОВА Н.А., МЕНШУТКИН В.В. И ДР. *Моделирование трансформации экосистемы Ладожского озера при снижении фосфорной нагрузки // Доклады Академии наук. – 2010. – Т. 434. – №5. – С. 684–687.*
  26. РУХОВЕЦ Л.А., АСТРАХАНЦЕВ Г.П., МИНИНА Т.Р. *Экономические механизмы сохранения водных ресурсов*

- больших стратифицированных озер и их использование // Проблемы безопасности в водохозяйственном комплексе России. – Краснодар: ООО «Авангард плюс». 2010. – С. 393–403.*
27. РУХОВЕЦ Л.А., ПЕТРОВА Н.А., МЕНШУТКИН В.В. И ДР. *Исследование реакции экосистемы Ладожского озера на снижение фосфорной нагрузки // Водные ресурсы. – 2011. – Т. 38. – №6. – С. 740–752.*
28. *Ladoga and Onego – Great European Lakes. Observation and Modelling / Rukhovets L., Filatov N. (Eds.). – Springer Praxis, 2010. – 302 p.*
29. RUKHOVETS L.A., ASTRAKHANTSEV G.P., MENSHUTKIN V.V. ETC. *Development of Lake Ladoga Ecosystem Models: Modelling of the Phytoplankton Succession in the Eutrophication Process. I. // Ecol. Modelling. – 2003. – V. 165. – No.1. – P. 49-77.*

## ASSIMILATIVE CAPACITY ESTIMATE GENERATION USING MODELS OF GREAT LAKES' ECOSYSTEMS

**Guennadiy Astrakhantsev**, Institute for Economics and Mathematics at St.-Petersburg, Russian Academy of Sciences, St.-Petersburg, Doctor of Science, professor (astr@emi.nw.ru; astrg@mail.ru).

**Vladimir Menshutkin**, Institute for Economics and Mathematics at St.-Petersburg, Russian Academy of Sciences; St.-Petersburg, Doctor of Science, professor (vvm@emi.nw.ru).

**Tatiana Minina**, Institute for Economics and Mathematics at St.-Petersburg, Russian Academy of Sciences; St.-Petersburg, Cand. Sc. (minina@emi.nw.ru; trminina@yandex.ru).

*Abstract: The mathematical modeling framework of lakes' ecosystems (with Ladoga and Onega lakes serving as examples) was developed for more than 25 years by Professor L.A. Rukhovets and his team with main results published in the leading Russian and worldwide scientific journals and monographs. Development of economic mechanisms of water use management for large stratified lakes is a natural extension of these studies. We consider the abilities of existing mathematical models for numeric estimates of assimilation capacity of the greatest freshwater lakes.*

Keywords: economic evaluation; ecosystems of lakes; assimilative capacity; water resources; rational nature management.

*Статья представлена к публикации  
членом редакционной коллегии Д.А. Новиковым*

*Поступила в редакцию 31.01.2015.  
Опубликована 31.05.2015.*