

УДК 556.072: 556

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СОХРАНЕНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Л. А. Руховец¹, Н. Н. Филатов²

¹ Санкт-Петербургский экономико-математический институт РАН

² Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Работа основана на использовании трехмерных моделей гидротермодинамики и экосистемы Онежского озера для обоснования методов сохранения качества воды в озере. Расчеты выполнены при разных климатических условиях и биогенных нагрузках. Получены оценки ассимиляционного потенциала и предельных нагрузок на озеро для сохранения качества вод. Применяются также математические модели для изучения распространения загрязняющих веществ в озере.

Ключевые слова: Онежское озеро, моделирование, эвтрофирование, загрязнение, ассимиляционный потенциал.

L. A. Rukhovets, N. N. Filatov. APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELS TO THE TASKS OF PRESERVATION OF ONEGO LAKE WATER RESOURCES

Three-dimensional models of the Lake Onego ecosystem were used to substantiate the methods of preservation of water quality in the lake. Simulations were performed at different climatic conditions and nutrient load. The spread of pollutants across the lake were studied using mathematical models. Maximum permissible loads were determined.

Key words: Lake Onego, mathematical models, eutrophication, pollution, assimilation potential.

Введение

Задачи сохранения качества водных ресурсов больших стратифицированных озер, таких как Ладожское и Онежское, и других водных объектов суши, таких как реки и небольшие озера, имеют существенные различия, поскольку время реакции крупных озер на внешние воздействия измеряется годами. Это время кратно времени условного водообмена. Для Онежского озера время условного водообмена равно 14 годам. Отсюда следует, что мероприятия по регулированию водопользования, а также сбросы загрязняющих веществ и биогенов (ЗВ и Б) в озеро могут оказывать весьма длительные по времени воздействия на экосистему озера даже после окончания

мероприятия (например, после прекращения сброса ЗВ и Б).

Задачу сохранения водных ресурсов Онежского озера можно, с определенной долей условности, разделить на две.

Первая задача связана с развитием процесса антропогенного эвтрофирования Онежского озера. В Онежском озере этот процесс в настоящее время находится в начальной стадии по сравнению с развитием такого процесса в Ладожском озере.

В Ладожском озере процесс антропогенного эвтрофирования начал развиваться после 1962 г., когда стала резко расти фосфорная нагрузка. К началу 1980-х гг. Ладожское озеро перешло из олиготрофного в мезотрофное состояние. После 1983 г. стали приниматься меры

по снижению фосфорной нагрузки. Исследования процесса антропогенного эвтрофирования Ладожского озера представлены в монографиях [Ладожское озеро..., 2002; Rukhovets, Filatov, 2010].

Процесс антропогенного эвтрофирования в Онежском озере затронул, в основном, только губы озера (Петрозаводскую и особенно Кондопожскую). В целом в центральной части озера, в Большом Онего, вода по-прежнему высокого качества [Rukhovets, Filatov, 2010].

Однако рост экономики в Северо-Западном регионе России и в Республике Карелия в частности может привести к росту биогенной нагрузки на Онежское озеро. Поэтому исследования процесса антропогенного эвтрофирования в озере являются весьма актуальными.

Вторая задача связана с загрязнением акватории Онежского озера, основным источником которого являются загрязненные воды, поступающие с речным притоком, а также сточные воды населенных пунктов, расположенных на побережье, прежде всего Петрозаводска, Кондопоги, Медвежьегорска. В принципе решить задачу снижения загрязнения вод озера можно путем прекращения сброса загрязнений. Разумеется, реальное решение этой задачи требует значительных затрат.

Здесь уместно отметить, что процесс антропогенного эвтрофирования большого стратифицированного озера, запущенный ростом биогенной нагрузки, не поддается остановке в короткие сроки даже при значительных затратах на снижение нагрузки. Более того, процесс антропогенного эвтрофирования может продолжаться даже при снижении антропогенной нагрузки до уровня, имевшего место в олиготрофный период состояния озера. Примером может служить Ладожское озеро [Руховец и др., 2010].

Отметим, что обе задачи важны для решения проблемы сохранения водных ресурсов Онежского озера. В данной статье мы рассматриваем некоторые аспекты применения математических моделей для решения задач сохранения водных ресурсов Онежского озера.

Ассимиляционный потенциал природной среды и задача сохранения водных ресурсов

Ассимиляционный потенциал (АП) природной среды – ее самовосстановительная способность по отношению к поступлению в природную среду вещества и энергии в результате хозяйственной деятельности. АП природной среды можно рассматривать как часть национального богатства каждой страны [Путь России в XXI век..., 1999]. АП природной среды

России является одним из значимых факторов поддержания устойчивости всей биосферы. Одной из важнейших в проблеме сохранения АП природной среды является проблема сохранения АП крупнейших пресноводных озер.

АП представляет собой особый вид природного ресурса. В этой связи задача получения экономической оценки АП важна как сама по себе, так и в рамках общей оценки природного богатства России [Обоснование стратегий..., 2006].

Применительно к водным ресурсам АП локализован по водным объектам. Для определения экономической оценки АП необходимо предварительно получить его количественную оценку. Представляется достаточно очевидным, что количественные оценки АП неодинаковы для разных озер в силу различия физико-географических условий на их водосборных бассейнах, а также в силу различий их пространственных характеристик.

В качестве количественной оценки АП представляется естественным принять систему лимитов (по ингредиентам) на объемы сброса ЗВ и Б, соблюдение которых сохраняет устойчивость водных экосистем. Задача определения этих лимитов достаточно сложна. Она требует наличия разнообразной информации о водном объекте и использования математических моделей гидродинамики и моделей экосистемы. В этой связи задача получения оценок допустимых уровней сбросов ЗВ и Б и задача оценки АП по ингредиентам по сути совпадают. В данной статье математические модели, представленные далее, используются для определения уровня допустимой биогенной нагрузки на экосистему Онежского озера, расчета распространения загрязнений, приносимых основными реками, впадающими в озеро.

Математические модели гидротермодинамики и экосистемы

К настоящему времени для Онежского озера имеются три трехмерные модели: гидротермодинамики большого стратифицированного озера, переноса пассивной примеси и экосистемы Онежского озера.

Модель гидротермодинамики для Онежского озера была получена путем адаптации модели гидротермодинамики большого стратифицированного Ладожского озера [Astrakhantsev et al., 1998] к конкретным морфометрическим параметрам Онежского озера. В этой работе принимали участие сотрудники ИВПС КарНЦ РАН [Руховец, Филатов, 2004].

Модель переноса пассивной примеси фактически совпадает с трехмерной моделью трансформации трехмерного поля температуры. В силу специфики уравнений геофизической гидродинамики в гидростатистическом приближении расчеты распространения пассивной примеси необходимо проводить одновременно с расчетом гидротермодинамического режима водоема [Астраханцев и др., 2003].

Модель экосистемы Онежского озера [Моделирование экосистемы..., 2004] представляла собой адаптацию модели Ладожского озера, созданной В. В. Меншуткиным и О. Н. Воробьевой (в кн.: [Современное состояние..., 1987]).

С помощью этих моделей был решен ряд задач:

- воспроизведена климатическая циркуляция Онежского озера [Руховец и др., 2006];
- оценено возможное влияние на гидротермодинамический режим озера потепления климата [Филатов и др., 2003; Руховец, Филатов, 2004; Rukhovets, Filatov, 2010];
- оценено возможное влияние глобального потепления климата на функционирование экосистемы Онежского озера [Руховец, Филатов, 2004; Rukhovets, Filatov, 2010].

Как уже отмечалось, с использованием модели гидротермодинамики в работах [Руховец, Филатов, 2004; Руховец и др., 2006] построена климатическая циркуляция Онежского озера, а также еще несколько циркуляций, которые соответствуют различным сценариям возможных изменений климата на водосборе. Всего, таким образом, построено пять циркуляций Онежского озера: климатическая; теплая; теплая с повышенным притоком; теплая с пониженным притоком; холодная. Здесь названия циркуляций соответствуют использованию в расчетах данных о максимальных и минимальных среднемесячных значениях теплозапаса водного тела озера и минимальных и максимальных значениях годового притока в озеро [Rukhovets, Filatov, 2010].

Для каждой из этих пяти циркуляций было воспроизведено с помощью модели экосистемы круглогодичное функционирование экосистемы озера при различных уровнях биогенной нагрузки на водоем [Руховец и др., 2006]. В проведенных вычислительных экспериментах рассмотрены четыре варианта биогенной нагрузки.

Первый вариант соответствовал годовой нагрузке, равной 1003 т Р/год и 17 739 т N/год для периодов 1986–1987 и 1992–1997 гг. [Онежское озеро, 1999, с. 62–64]. Анализ внутригодового распределения поступления биогенов в озеро показывает, что это распределение сильно

коррелирует с внутригодовым распределением водного притока. Поэтому дополнительное поступление биогенов за счет сточных вод и атмосферных осадков в озеро в модели распределялось в соответствии с указанной связью.

Второй вариант соответствовал годовой нагрузке, имевшей место в 2001–2002 гг.: 786 т Р/год и 15 051 т N/год [Руховец и др., 2006]. При этом следует отметить, что снижение биогенной нагрузки, в основном, связано со снижением поступления биогенов с речным притоком.

Для исследования изменений в экосистеме Онежского озера в долгосрочной перспективе были рассмотрены еще третий и четвертый гипотетические варианты биогенных нагрузок. В качестве третьего варианта была взята повышенная биогенная нагрузка, равная 1500 т Р/год и 27 000 т N/год, в качестве четвертого – 2000 т Р/год и 36 000 т N/год. Эти нагрузки в 1,5 и 2 раза превышают зарегистрированные нагрузки, средние для периода 1992–1997 гг. Авторы исходили из того, что такое увеличение весьма значительно и может реализоваться, если в перспективе резко вырастет валовой региональный продукт (ВРП) и при этом сохранится современный характер экономики и сложившееся отношение к сохранению качества вод в водных объектах.

Результаты проведенных вычислительных экспериментов представлены на рис. 1–3.

Анализ результатов, представленных в [Руховец, Филатов, 2004; Rukhovets, Filatov, 2010], позволяет сделать два вывода:

- во-первых, при сохранении биогенной нагрузки на уровне 800 т Р/год и 1500 т N/год пелагиаль озера должна сохранять свой олиготрофный статус, что позволяет принять эти величины в качестве оценок АП по сбросу фосфора и азота в озеро;

- во-вторых, полученные оценки практически не меняются при возможных изменениях климата на водосборе озера.

Полученные количественные оценки АП могут быть использованы в задачах по обоснованию ставок платежей за сброс биогенов – азота и фосфора – в акваторию озера.

Моделирование распространения загрязнений в Онежском озере

Краткая характеристика современной антропогенной нагрузки на водоем. Воспроизведение процесса загрязнения акватории озера представляется важным для решения задач сохранения и использования его водных ресурсов. Экономический рост в стране, в том числе на водосборе Онежского озера, начавшийся в

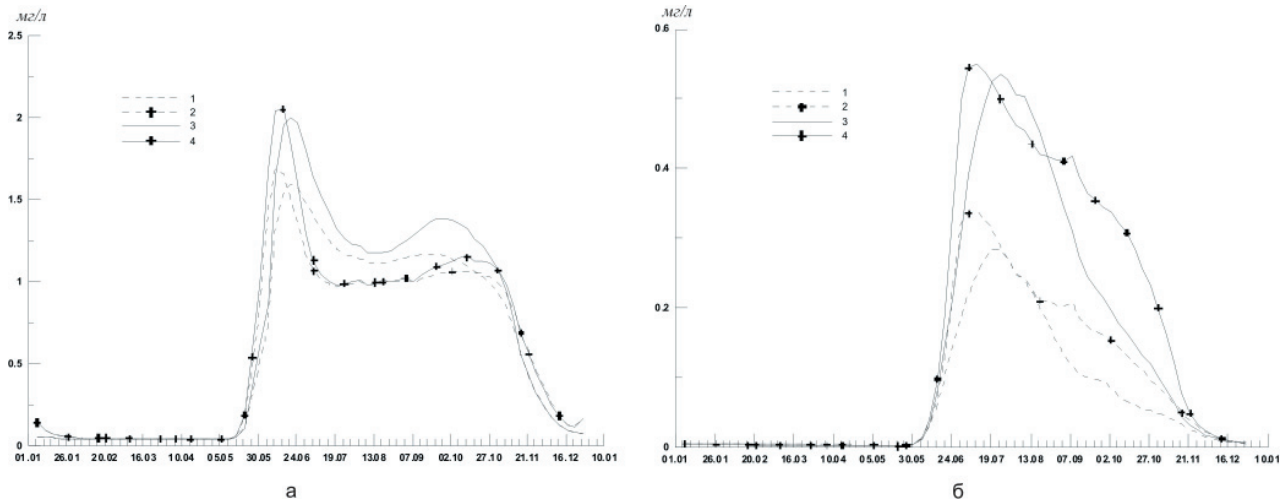


Рис. 1. Среднегодовая динамика общей сырой биомассы фитопланктона, мг/л (а), и общей сырой биомассы зоопланктона, мг/л (б); результаты моделирования при нагрузке 786 т $P_{\text{общ}}/\text{год}$ и 15 051 т $N_{\text{общ}}/\text{год}$: климатическая циркуляция (1), теплая циркуляция (2); результаты моделирования при нагрузке 1003 т $P_{\text{общ}}/\text{год}$ и 17 739 т $N_{\text{общ}}/\text{год}$: климатическая циркуляция (3), теплая циркуляция (4)

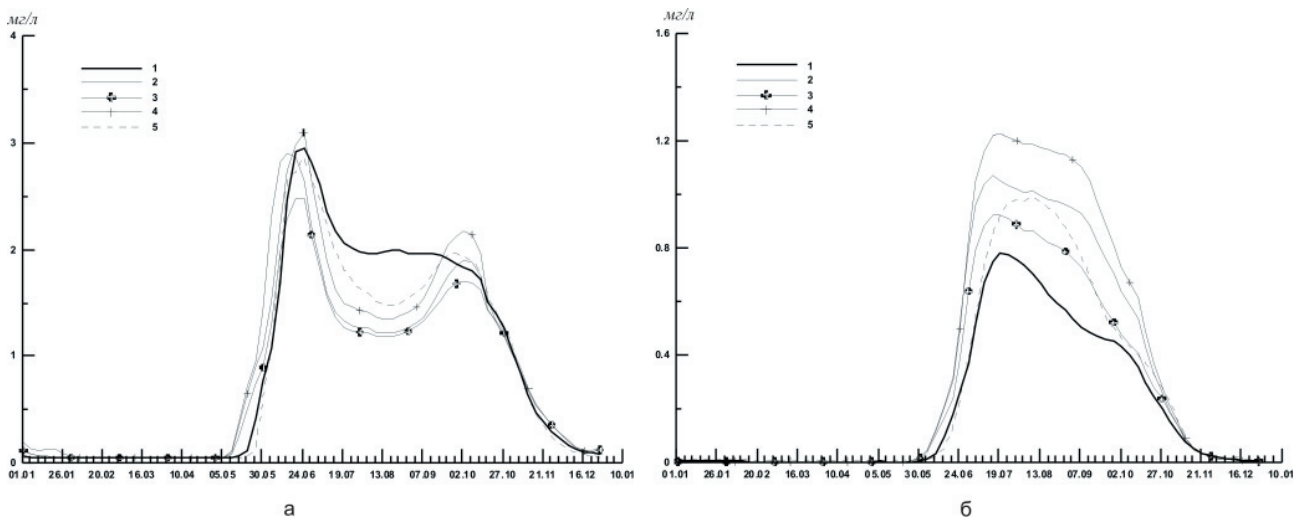


Рис. 2. Среднегодовая динамика общей сырой биомассы фитопланктона, мг/л (а), и общей сырой биомассы зоопланктона, мг/л (б); результаты моделирования при нагрузке 1500 т $P_{\text{общ}}/\text{год}$ и 27 000 т $N_{\text{общ}}/\text{год}$: климатическая циркуляция (1), теплая циркуляция (2), климатическая циркуляция с повышенным притоком (3), климатическая циркуляция с пониженным притоком (4), холодная циркуляция (5)

1999 г., может со временем привести к усилению антропогенного пресса на водоем. В этой связи исследования загрязнения озера методами математического моделирования, несомненно, актуальны.

Исследования процесса распространения загрязнений Онежского озера специалистами Карельского НЦ РАН начались достаточно давно. Подробно результаты этих исследований представлены в работах сотрудников Института водных проблем Севера КарНЦ РАН [Онежское озеро, 1999].

Загрязнение озера, наряду антропогенным эвтрофированием, является одним из существенных факторов, определяющих качество воды Онежского озера – важного источни-

ка питьевого и промышленного водоснабжения. Как отмечается в [Онежское озеро, 1999; Rukhovets, Filatov, 2010], повышение концентрации биогенных элементов, в основном фосфора и отчасти азота, наблюдается только в прибрежной зоне озера, преимущественно в губах и заливах. При этом уже с начала 90-х гг. наблюдается даже снижение концентрации биогенных элементов, как следствие снижения внешней антропогенной нагрузки, связанного с экономическим спадом в период 1990–1999 гг. Так, по данным из [Онежское озеро, 1999, с. 74, табл. 3.12] концентрация $P_{\text{общ}}$ в центральной и внешней частях Петрозаводской губы в период 1990–1996 гг. заметно снизилась (во внешней части губы с 30 мкг/л в период

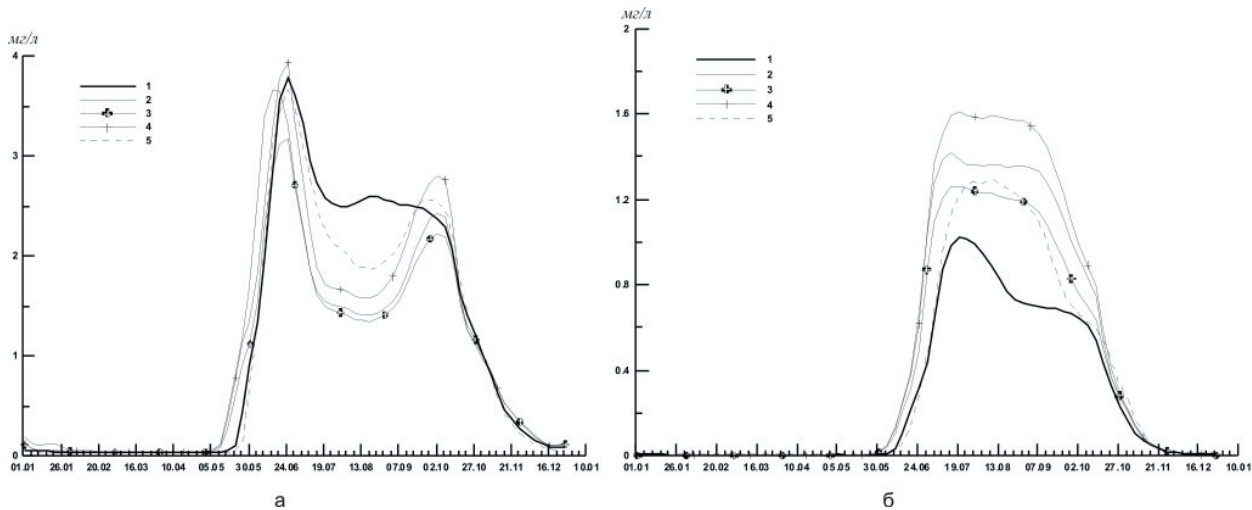


Рис. 3. Среднегодовая динамика общей сырой биомассы фитопланктона, мг/л (а), и общей сырой биомассы зоопланктона, мг/л (б); результаты моделирования при нагрузке 2000 т $P_{\text{общ}}/\text{год}$ и 36 000 т $N_{\text{общ}}/\text{год}$: климатическая циркуляция (1), теплая циркуляция (2), климатическая циркуляция с повышенным притоком (3), климатическая циркуляция с пониженным притоком (4), холодная циркуляция (5)

1987–1990 гг. до 17 мкг/л). Следует отметить, что основная часть озерной котловины заполнена чистыми олиготрофными водами.

Одним из наиболее значимых факторов загрязнения Онежского озера является поступление в озеро тяжелых металлов (Fe, Cu, Zn, Pb и др.), а также таких металлов, как Mn и Al, которые также важны с точки зрения загрязнения озера. Основным источником поступления металлов в озеро являются воды, поступающие с речным притоком. Следует отметить, что как фоновые концентрации, так и концентрации, связанные с антропогенной нагрузкой, практически по всем перечисленным субстанциям не превышают ПДК. Исключение составляют вершины Петрозаводской и Кондопожской губ [Онежское озеро. Атлас, 2010]. Таким образом, картину загрязнения металлами до какой-то степени можно считать благополучной, однако постоянное воздействие малых доз также опасно для водоема [Израэль, Цыбань, 2008].

Поступление сточных вод в водоем, как правило, привязано к населенным пунктам. Объемы поступления сточных вод определяются численностью и распределением населения в прибрежной зоне озера и развитостью систем очистки сточных вод. К сожалению, КОС имеется только в Петрозаводске [Онежское озеро. Атлас, 2010].

К числу значимых загрязнений Онежского озера относится также нефтяное загрязнение. В особенности оно было существенно до 1991 г. Первые результаты моделирования нефтяного загрязнения в Петрозаводской губе с помощью созданной авторами модели представлены в [Моделирование экосистемы..., 2004]. Харак-

теризуя ситуацию с загрязнением Онежского озера в целом, следует заметить, что за исключением вершинных участков губ и заливов озера, особенно вершинных частей Петрозаводской и Кондопожской губ, качество воды остается хорошим (воды характеризуются как чистые).

Моделирование переноса загрязнений. Для проведения расчетов распространения загрязнений использовались созданные авторами трехмерные модели: модель гидротермодинамики и модель распространения пассивной примеси. Первая из этих моделей [Astrakhantsev et al., 1998] была в 2002 г. адаптирована к проведению расчетов циркуляции и температурного режима Онежского озера. С помощью этой модели была впервые воспроизведена климатическая циркуляция Онежского озера. Подробное описание климатической циркуляции приведено в препринте [Моделирование..., 2003].

Для расчета распространения загрязнений в Онежском озере авторы адаптировали созданную ранее модель распространения пассивной примеси, применявшуюся ими для Ладожского озера [Астраханцев и др., 2003]. Адаптация сводилась к согласованию модели распространения примеси с моделью гидротермодинамики водоема, с помощью которой была построена климатическая циркуляция озера.

Представим кратко математическую модель распространения пассивной примеси в водоеме. Для описания распространения гидродинамически пассивной примеси в водной среде обычно используется следующее уравнение турбулентной диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} + \gamma C = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + f(x, y, z, t)$$

с соответствующими краевыми и начальными условиями. Здесь $C(x, y, z, t)$ – концентрация примеси; (u, v, w) – вектор скорости движения воды, γ – коэффициент неконсервативности; v_x, v_y, v_z – коэффициенты турбулентной диффузии; $f(x, y, z, t)$ – функция, описывающая поступление (или сток) примеси.

Созданная в [Астраханцев и др., 2003] соответствующая дискретная модель представляет собой полученную методом сумматорной аппроксимации систему сеточных уравнений, аппроксимирующих краевую задачу для трехмерного уравнения переноса, в котором учтена возможность оседания примеси с постоянной вертикальной скоростью, тем самым учтена и возможность расчета неконсервативной примеси. При этом допускается поступление примеси через поверхность водоема, с речным притоком и от береговых и внутриводоемных источников.

Для новой дискретной модели распространения примеси, согласованной с моделью гидротермодинамики, справедлив точный аналог закона сохранения вещества, что использовалось для контроля счета. Новая модель имеет более высокий порядок аппроксимации, чем созданная авторами ранее аналогичная модель [Астраханцев и др., 1988].

О верификации модели заметим следующее. С вычислительной точки зрения задача о переносе примеси фактически описывается теми же дискретными уравнениями, что и задача о распространении тепла в водоеме. Тот факт, что поле температуры, его эволюция во времени воспроизведены для Онежского озера достаточно достоверно [Моделирование..., 2003], позволяет считать, что и поле концентраций примесей воспроизводится с не меньшей достоверностью. Следует отметить, что расчеты полей концентраций гидродинамически пассивной примеси необходимо проводить совместно с интегрированием гидродинамической модели. Дело в том, что при расчетах распространения примеси необходимо учитывать перемешивание, реализация которого определяется полем температуры. Поэтому при расчетах поле концентраций примеси перестраивается по алгоритму конвективного приспособления одновременно с полем температуры. Совместное интегрирование уравнений гидротермодинамики водоема и уравнения распространения примеси требует значительных временных затрат на проведение расчетов. Учитывая, что расчеты следует провести для значительного

числа субстанций, авторы пошли по пути построения так называемых функций влияния (функция влияния на каждый момент времени представляет собой трехмерное поле значений концентрации условной примеси). При моделировании было принято, что постоянно действующим источником поступления загрязнений является речной приток. При этом учитывались только четыре впадающие реки – Шуя, Суна, Водла и Вытегра. Для каждой из этих рек решалась задача о распространении условной примеси, поступающей со стоком этой реки с концентрацией 1 г/л, притом что из остальных рек эта условная примесь не поступает. В результате расчетов были построены зависящие от времени четыре сеточные функции. Их построение состояло в получении для каждой реки периодического решения путем совместного интегрирования системы уравнений гидротермодинамики водоема и уравнения распространения примеси. Построенные функции называются функциями влияния. С их помощью для каждой из субстанций, зная объемы ее поступления из каждой реки, можно получить трехмерные поля распределения каждой из субстанций и их трансформацию во времени.

Результаты расчетов функций влияния представлены на рис. 4–7 для каждой из рек. При этом на каждом из рисунков представлено распределение условной примеси на поверхности водоема для четырех моментов времени – по одному на каждый сезон. На рисунках проведены линии равной концентрации условной примеси (в г/л).

Практическое применение построенных функций влияния, очевидно, сводится к следующему. Для получения трехмерных полей концентрации определенной субстанции каждая из функций влияния умножается на фактическое значение концентрации данной субстанции в воде реки, и суммированием функций влияния получается трехмерное поле распределения данной субстанции на данный момент времени.

Заключение

Как показали результаты моделирования, сохранение олиготрофного статуса озера может быть обеспечено поддержанием поступления биогенов на уровне, не превышающем 800 т Р/год и 15 000 т N/год, и строительством комплексов очистных сооружений в городах, расположенных на побережье озера. Вычислительные эксперименты показали, что изменения

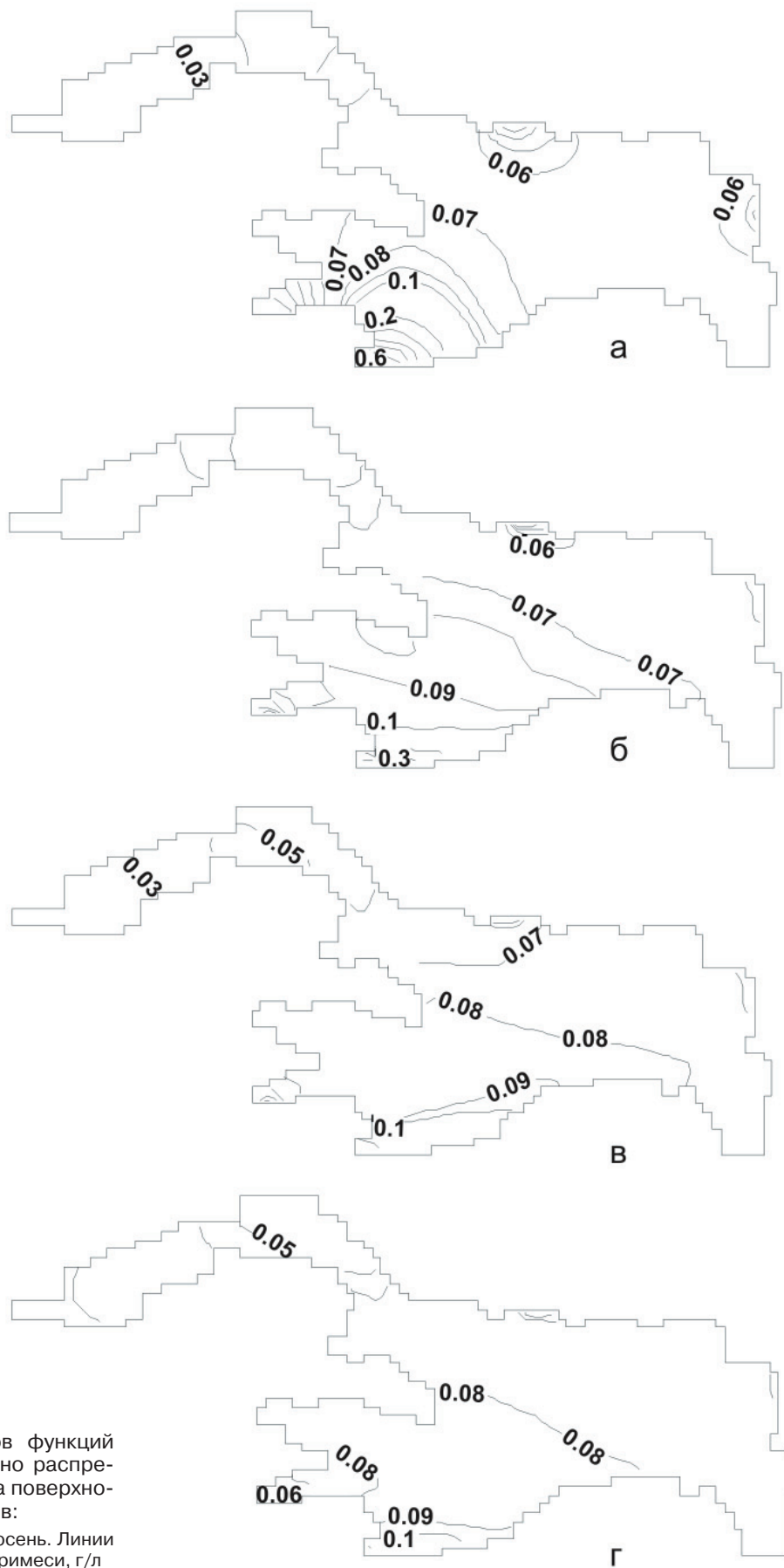


Рис. 4. Результаты расчетов функций влияния р. Шуи. Представлено распределение условной примеси на поверхности озера для четырех сезонов: а – зима, б – весна, в – лето, г – осень. Линии равной концентрации условной примеси, г/л

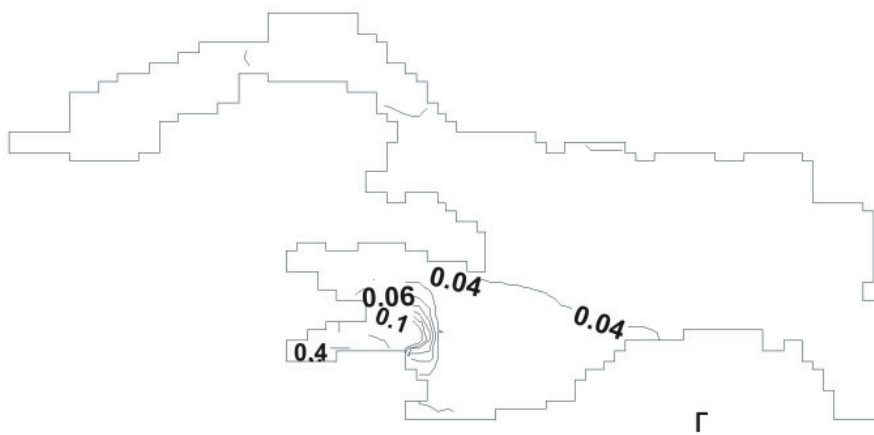
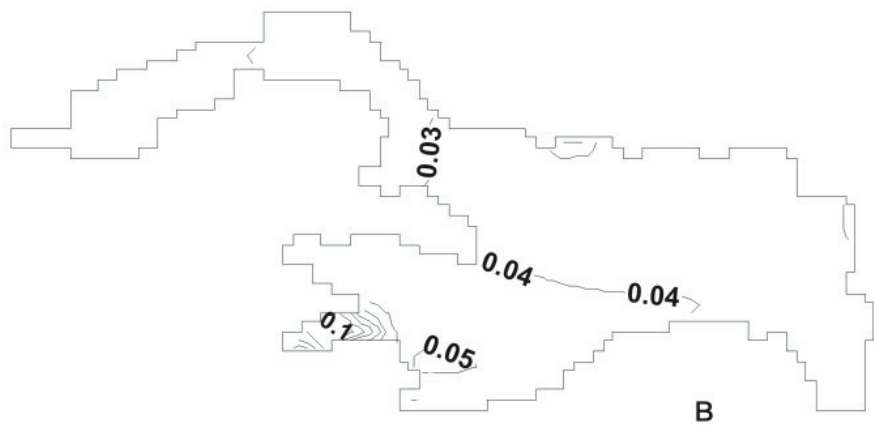
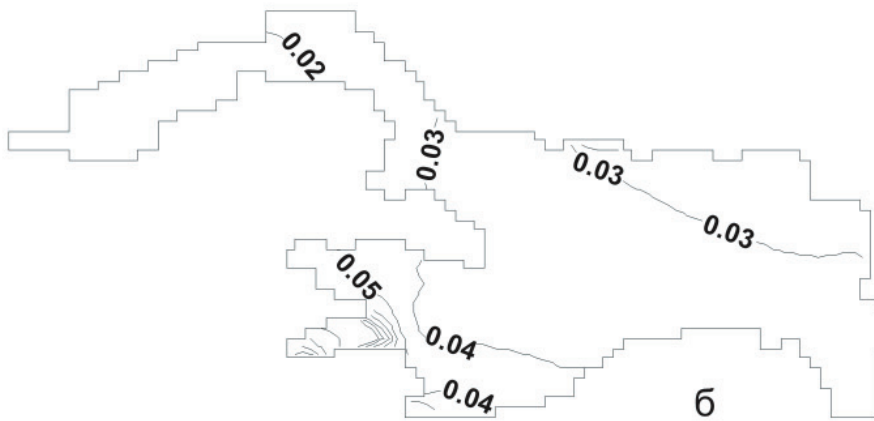
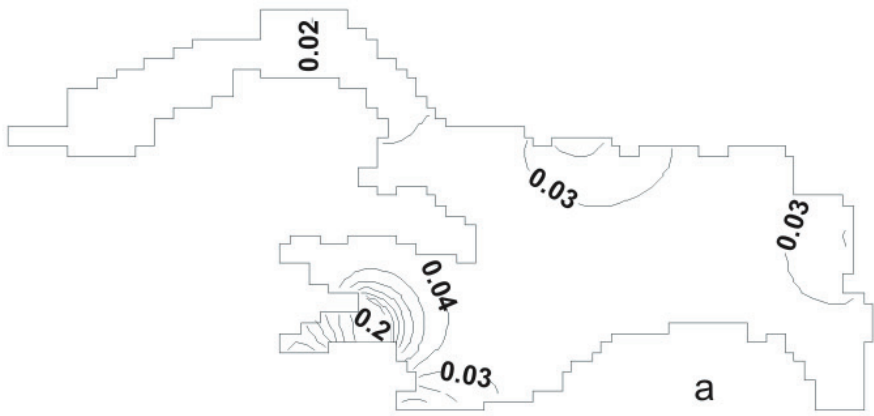


Рис. 5. Результаты расчетов функций влияния р. Суны. Представлено распределение условной примеси на поверхности озера для четырех сезонов: а – зима, б – весна, в – лето, г – осень. Линии равной концентрации условной примеси, г/л

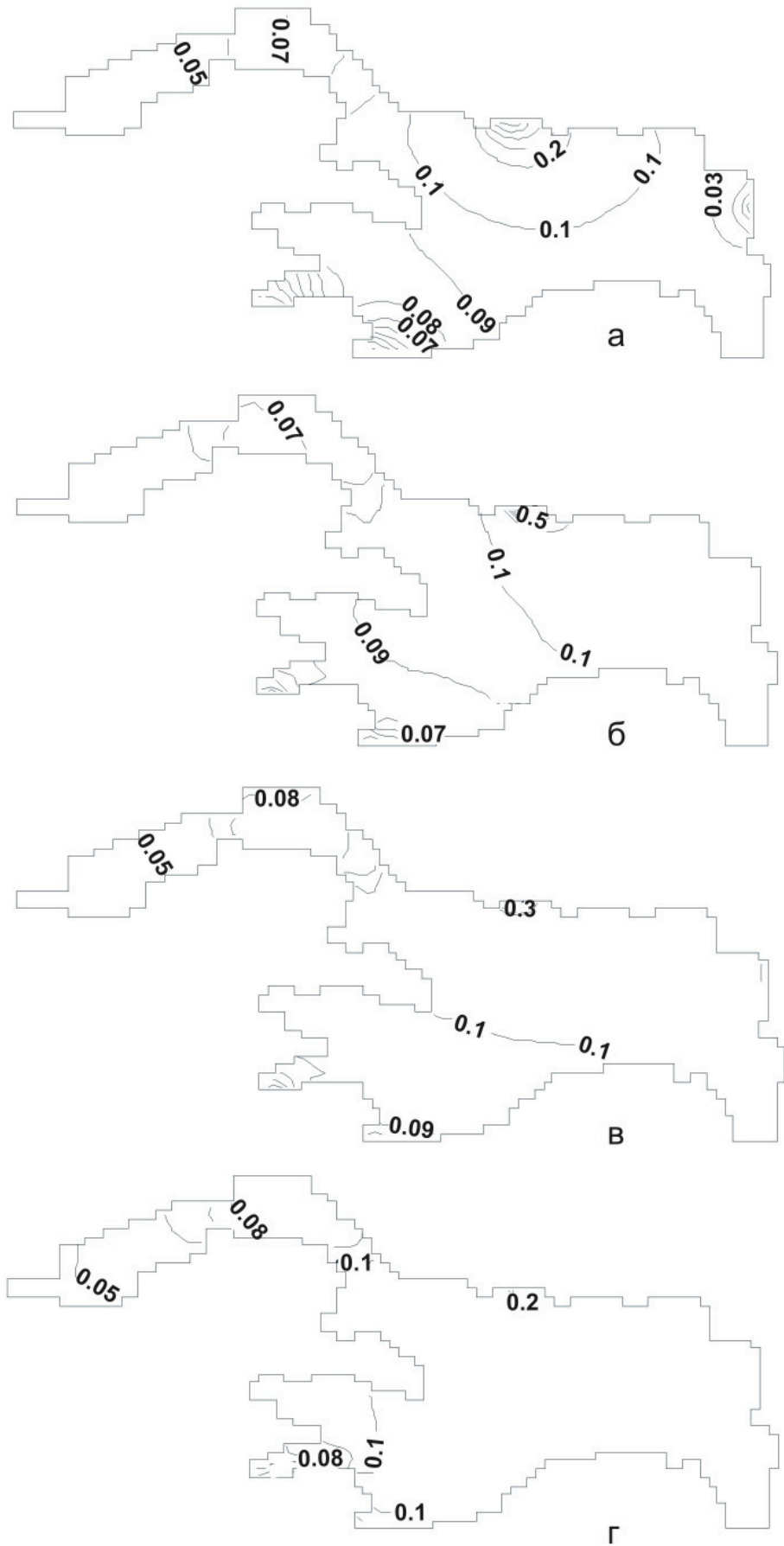


Рис. 6. Результаты расчетов функций влияния р. Водлы. Представлено распределение условной примеси на поверхности озера для четырех сезонов:

а – зима, б – весна, в – лето, г – осень. Линии равной концентрации условной примеси, г/л

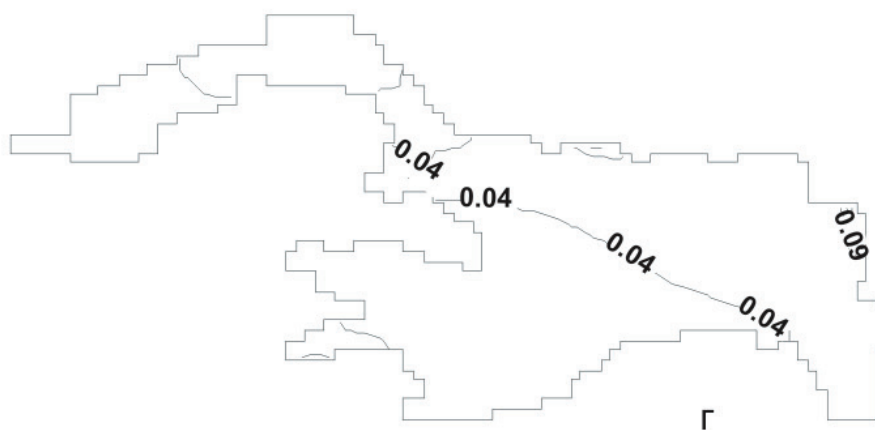
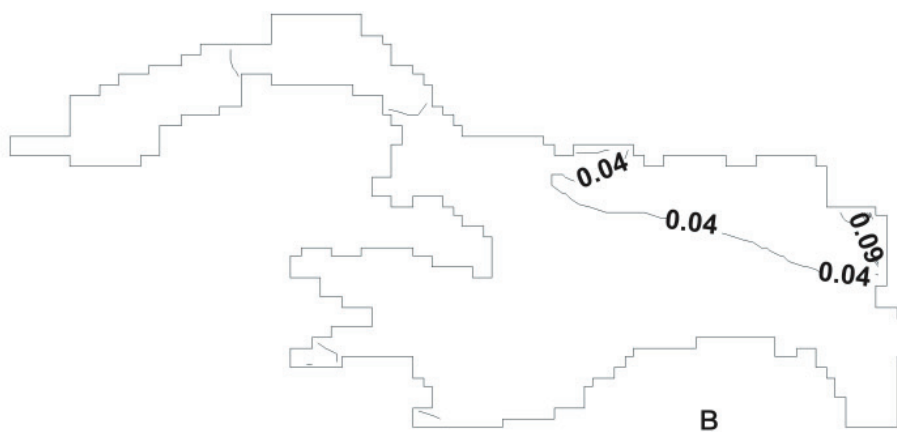
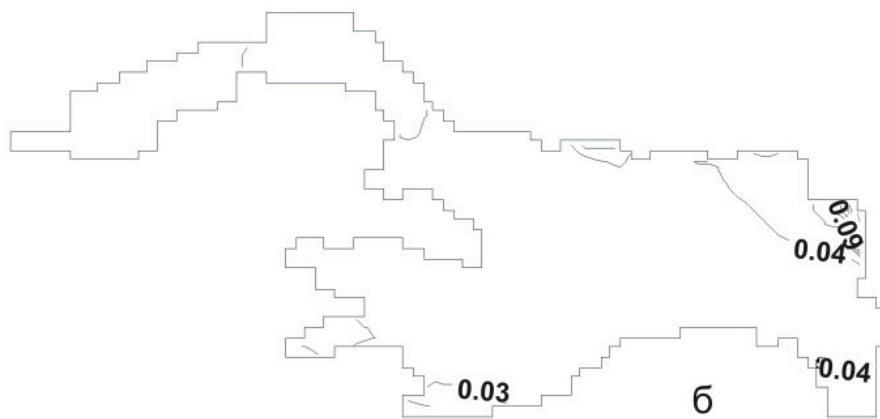
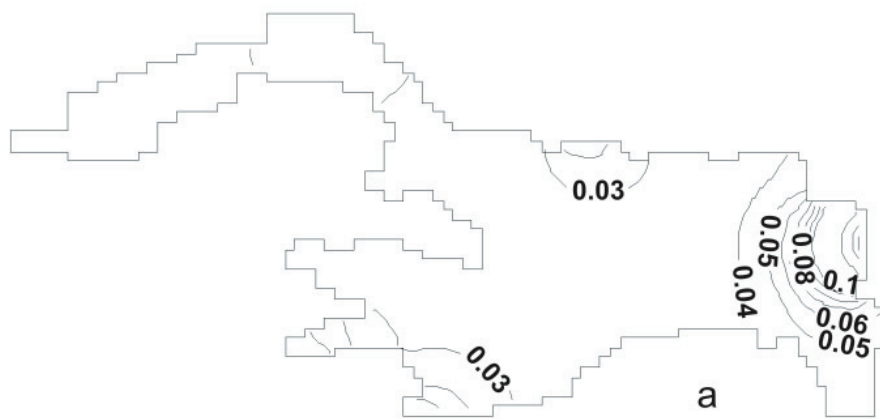


Рис. 7. Результаты расчетов функций влияния р. Вытегры. Представлено распределение условной примеси на поверхности озера для четырех сезонов:

а – зима, б – весна, в – лето, г – осень. Линии равной концентрации условной примеси, г/л

в гидротермодинамическом режиме озера при возможных изменениях климата в целом незначительны. В основном изменения относятся к осеннему периоду и второй половине лета, а изменения в годовой динамике биомассы фитопланктона (основного продуцента в экосистеме Онежского озера) заметны только в осенний период и незначительны. Реакция зоопланктона на изменение температурного режима озера более заметна, чем у фитопланктона, и она имеет место в течение всего вегетационного периода.

Существенно более значимой является реакция экосистемы озера на изменения антропогенной нагрузки, особенно на рост поступления биогенов.

Для основных рек были оценены особенности распространения загрязнений озера для четырех сезонов. Адаптированные авторами модели гидротермодинамики, экосистемы озера и распространения примеси могут быть использованы для создания системы поддержки принятия решений по управлению и сохранению водных ресурсов Онежского озера.

Авторы благодарны коллегам из наших институтов: Г. П. Астраханцеву, В. В. Меншуткину, Т. Р. Мининой, В. Н. Полоскову, А. Ю. Тержевику, вместе с которыми были разработаны и внедрены математические модели для исследования экосистемы Онежского озера и распространения в нем загрязнений, а также М. С. Богдановой за подготовку рисунков. Работа выполнена в рамках грантов РФФИ 10-05-00963, 10.06-00380 и программы фундаментальных исследований № 10 ОНЗ РАН.

Литература

Астраханцев Г. П., Егорова Н. Б., Руховец Л. А. Математическое моделирование распространения примеси в водоеме // Метеорология и гидрология. 1988. № 6. С. 71–79.

Астраханцев Г. П., Меншуткин В. В., Петрова Н. А., Руховец Л. А. Моделирование экосистем больших стратифицированных озер / Под ред. Л. А. Руховца. СПб.: Наука, 2003. 362 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Руховец Леонид Айзикович

директор СПб ЭМИ РАН, профессор, д. ф.-м. н.
Санкт-Петербургский экономико-математический институт РАН
ул. Чайковского 1, Санкт-Петербург
эл. почта: leor@emi.nw.ru
тел.: (812) 2737953

Филатов Николай Николаевич

директор ИВПС КарНЦ РАН, член-корр. РАН
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: nfilatov@rambler.ru
тел.: (8142) 576381; +79216292222

Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Антропогенная экология океана. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2008. 164 с.

Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее / Под ред. В. А. Румянцева и В. Г. Дробковой. СПб.: Наука, 2002. 327 с.

Моделирование Онежского озера для решения задач использования и сохранения его водных ресурсов / Под редакцией Л. А. Руховца и Н. Н. Филатова. СПб.: СПб ЭМИ РАН, 2003. 31 с.

Моделирование экосистемы Онежского озера и распространения загрязнений / Под ред. Л. А. Руховца и Н. Н. Филатова. (Препринт.) СПб.: СПб ЭМИ РАН, 2004. 32 с.

Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2007 год / Ред.: Ю. А. Израэль, А. В. Цыбань. М., 2008. 164 с.

Обоснование стратегий управления водными ресурсами / Отв. ред. В. И. Данилов-Данильян. М.: Научный мир, 2006. 335 с.

Онежское озеро / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 1999. 294 с.

Онежское озеро. Атлас. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2010. 151 с.

Путь России в XXI век: стратегические проблемы и перспективы российской экономики / Рук. авт. колл. Д. С. Львов. М.: Экономика, 1999. С. 248–249.

Руховец Л. А., Филатов Н. Н. (ред.). Влияние потепления климата на экосистемы больших озер Северо-Запада России (Ладога и Онега). Ч. 2. (Препринт.) СПб., 2004. 40 с.

Руховец Л. А., Филатов Н. Н., Тержевик А. Ю. и др. Онежское озеро сегодня и завтра: опыт математического моделирования // Водные ресурсы Европейского Севера России: итоги и перспективы исследований. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2006. С. 127–153.

Современное состояние экосистемы Ладожского озера / Под ред. Н. А. Петровой и Г. Ф. Расплетинной. Л.: Наука, 1987. 244 с.

Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Сало Ю. А., Тержевик А. Ю. Оценки возможных изменений климата в бассейне крупнейших озер Европы – Ладожского и Онежского // Влияние потепления климата на экосистемы больших озер Северо-Запада России (Ладога и Онега). Ч. 1 / Под ред. Л. А. Руховца и Н. Н. Филатова. (Препринт.) СПб., 2003. С. 6–22.

Astrakhansev G. P., Poloskov V. N., Rukhovets L. A. Numerical model of the Lake Ladoga: model of the climatic circulation and ecosystem model // Proceedings of workshop in Helsinki, 1998. May, N 5. 1998. P. 80–97.

Rukhovets L. A., Filatov N. N. (Eds.). Ladoga and Onego – Great European Lakes: Observations and Modeling. Springer-Praxis Publishing. 2010. 302 p.

Rukhovets, Leonid

St. Petersburg Institute of Economics and Mathematics, Russian Academy of Science
1 Chaikovsky St., St. Petersburg
e-mail: leor@emi.nw.ru
tel.: (812) 2737953

Filatov, Nikolai

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: nfilatov@rambler.ru
tel.: (8142) 576381; +79216292222