

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 574.5

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВНУТРЕННЕЙ БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ ВОДОЕМОВ (ОБЗОР)

Ю. С. Даценко

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Россия

Внутренняя биогенная нагрузка пресноводных водоемов является ключевым звеном в изучении и моделировании процессов эвтрофирования озер и водохранилищ. Представлен краткий обзор основных методов определения внутренней биогенной нагрузки водоемов. Все применяемые методы разделены на экспериментальные и расчетные. К числу экспериментальных методов отнесены прямые лабораторные определения потоков на границе вода – донные отложения и определение внутренней нагрузки по балансу биогенных веществ в гипolimнионе. Среди расчетных методов доминируют оценки потоков биогенных веществ из донных отложений, проводимые по расчетам внешнего баланса биогенных веществ в водоеме. К таким же методам отнесены оценки потоков веществ из донных отложений, основанные на определении содержания вещества в различных слоях донных отложений. Отдельно рассматриваются попытки использования эмпирических зависимостей для оценки внутренней нагрузки. Наиболее перспективными методами оценки внутренней нагрузки признаются методы математического моделирования внутриводоемных процессов. Приводятся примеры расчетов биогенной нагрузки. Подчеркиваются преимущества и недостатки каждого из представленных методов.

Ключевые слова: внутренняя биогенная нагрузка; поток фосфора из донных отложений; балансовые методы; фосфаты; минеральный азот; математическое моделирование.

Yu. S. Datsenko. METHODS FOR ASSESSMENT OF INTERNAL NUTRIENT LOAD OF WATER BODIES (A REVIEW)

Internal nutrient load of freshwater bodies is a key element in the study and modeling of the processes of eutrophication of lakes and storage reservoirs. A brief review of the main methods for determining the internal nutrient load of water bodies is presented. All the applied methods are divided into experimental and computational. The experimental methods include direct laboratory determination of fluxes at the water-sediment interface and determination of the internal load using the balance of nutrients in the hypolimnion. The prevalent group of computational methods is estimates of nutrient flux-

es from bottom sediments based on the calculation of the external balance of nutrients in the water body. This category of methods also includes estimates of substance fluxes from bottom sediments based on the determination of substance content in different layers of bottom sediments. A separate group considered is attempts to use empirical dependencies to assess the internal load. The most promising methods for estimating the internal load are the methods of mathematical modeling of intrabasin processes. Examples of nutrient load calculations are given. The strengths and weaknesses of each of the presented methods are highlighted.

Keywords: internal nutrient load; phosphorus flux from bottom sediments; mass balance methods; phosphates; mineral nitrogen; mathematical modeling.

Введение

Процесс эвтрофирования внутренних водоемов, принявший глобальный характер, уже давно находится в центре внимания лимнологов. Одним из ключевых вопросов в изучении проблемы эвтрофирования признается изменение соотношений потоков биогенных веществ на границе вода – донные отложения, которые формируют внутреннюю биогенную нагрузку на экосистему водоема. Внутренняя биогенная нагрузка на водоем часто отождествляется с поступлением в водоем минеральных форм биогенных веществ из донных отложений. Механизмы потоков со дна в воду подразделяются на диффузионный поток растворенных соединений биогенных веществ и конвективный перенос на границе вода – дно. Конвективный перенос включает ветровое и антропогенное взмучивание, биотурбацию, газоотделение со дна в анаэробных условиях, влияние жизнедеятельности макрофитов, колоний бентических водорослей и придонных рыб, а также ряд других, менее значимых процессов. Ветровое взмучивание донных отложений как источник биогенных веществ имеет важное значение в мелководных водоемах в безледный период. В глубоководных стратифицированных водоемах основным механизмом выделения азота и фосфора из донных отложений остается диффузия их растворенных соединений. Значимость биогенных процессов носит локальный характер и обычно существенно меньше процессов диффузии и конвекции.

Теоретические вопросы накопления, трансформации, миграции биогенных веществ, а также механизмов, формирующих их поток со дна водоемов, наиболее полно рассмотрены в работах М. В. Мартыновой и И. Б. Мизандронцева [Мартынова, 1981, 1984а, б, 1988, 2010; Мизандронцев, 1990; Мартынова и др., 2017].

С практической точки зрения наибольший интерес представляют способы количественной оценки величины потоков биогенных веществ, в первую очередь азота и фосфора,

из донных отложений в воду. Обобщая многочисленные попытки оценки потока биогенных веществ из донных отложений в водную массу водоемов, представленные в основном в отечественной лимнологической литературе, разнообразные методы определения внутренней биогенной нагрузки на экосистему водоема можно подразделить на экспериментальные (лабораторные и полевые) и расчетные.

Экспериментальные методы

Метод оценки потока биогенных веществ из донных отложений путем лабораторных экспериментов

Это наиболее распространенный метод, основанный на прямых наблюдениях за концентрациями биогенных веществ в системе «вода – донные отложения». Состоит в контроле за изменением концентрации биогенного вещества в изолированном объеме воды над донными отложениями. Донные отложения для эксперимента отбираются в водоеме с помощью оборудования, обеспечивающего отбор ненарушенной колонки донных отложений, и инкубируются в трубках. Затем по изменению концентрации в трубках определяется интенсивность потока биогенных веществ из донных отложений в воду. Экспериментальная основа таких методов описана еще в 70-х годах прошлого века [Романенко, Кузнецов, 1974], и до настоящего времени он многократно применялся для прямого измерения интенсивности потоков биогенных веществ из донных отложений [Мартынова, 1981; Лозовик, 1985; Жукова и др., 1990; Бреховских и др., 1999]. Общая схема постановки таких лабораторных экспериментов представлена в работе [Мартынова, Козлова, 1987].

Преимущество этого метода, обеспечившее его распространение, состоит в прямом определении потока биогенного вещества. Один из главных недостатков метода обусловлен необходимостью многократных постановок экспериментов с учетом высокой пространст-

венно-временной изменчивости определяемых величин потоков веществ.

Метод оценки внутренней нагрузки по балансу биогенных веществ в гиполимнионе водоема

Этот метод следует отнести к экспериментальным, поскольку для определения интенсивности выноса биогенных веществ из донных отложений требуется реализация специальной программы мониторинга. Метод основан на оценке внутренней биогенной нагрузки по результатам расчета баланса биогенного вещества в воде водоема, при котором поток биогенного элемента из донных отложений рассматривается как неизвестный член баланса. Для надежного расчета балансовых составляющих биогенных веществ в водоеме необходима детальная информация, требующая большого количества определений их концентраций в различных слоях водоема. Задачу можно существенно упростить, если рассматривать относительно обособленный плес водоема в течение периода, когда адвективными составляющими баланса биогенных веществ можно пренебречь. В случае вертикального плотностного расслоения водной массы плеса придонный слой можно считать изолированным и, рассчитав изменение запаса биогенного вещества в нем, оценить интенсивность потока биогенных веществ из донных отложений. Определение объема вод, изолированных изобатой, соответствующей положению термоклина, и измеренные концентрации минеральных форм биогенных веществ позволяют рассчитывать изменения их запаса в воде гиполимниона через определенные промежутки времени. Это изменение, если пренебречь обменом через термоклин, происходит за счет выноса биогенных веществ из донных отложений. Тогда отношение вычисленного изменения массы биогенного вещества к площади поверхности дна плеса дает плотность потока соединений биогенных веществ из донных отложений.

В качестве примера применения такого метода можно привести расчет потоков минерального фосфора в Красновидовском плесе подмосковного Можайского водохранилища в летний период [Даценко, 1998]. Результаты проведенных расчетов хорошо коррелировали с измеренными в этот же период величинами потока фосфора, определенными лабораторным методом.

Этот метод оценки внутренней нагрузки позволяет определять изменчивость выноса фосфора в зависимости от колебаний вертикаль-

ной гидрологической структуры водной массы плеса в результате смены синоптических условий. В различные годы соотношение внешней и внутренней летней нагрузки может существенно различаться. В холодное и дождливое лето приток фосфора в водохранилище с речными водами повышен, а его вынос из донных отложений менее интенсивен. Напротив, в жаркое лето роль внутренней нагрузки водохранилища фосфором резко повышается.

Преимущество метода состоит в возможности интегральной оценки выноса и учета изменения вертикальной структуры водной массы водоема. Недостаток метода связан с пренебрежением обменом через термоклин и адвекцией биогенных веществ (если рассматривается отдельный плес водоема). Определенные сложности может вызвать выбор периода специальных учащенных наблюдений за распределением фосфатов по вертикали, который должен соответствовать минимуму горизонтальной адвекции.

Расчетные методы

Интегральная оценка внутренней нагрузки по балансовым уравнениям Фолленвейдера

Интегральную оценку внутренней нагрузки можно получить, используя широко распространенную среди лимнологов стационарную модель эвтрофирования водоемов [Vollenweider, 1975].

В балансовых уравнениях Р. Фолленвейдера величина биогенной нагрузки на водоем определяется с учетом суммарной нагрузки (внешней и внутренней). Попытку разделить в этих моделях внешнюю и внутреннюю нагрузку предпринял Дж. Нюрнберг [Nurnberg, 1984], представив балансовое уравнение с учетом внутренней нагрузки в виде:

$$P = P_{вх} \cdot (1 - R) + \frac{LP_{внут}}{h \cdot K_B}, \quad (1)$$

где $P_{вх}$ и P – концентрация биогенного вещества на входе в водоем и в водоеме соответственно, $г м^{-3}$; $LP_{внут}$ – внутренняя биогенная нагрузка водоема, $г м^{-2} год^{-1}$; P – концентрация фосфора в водоеме, $г м^{-3}$; R – коэффициент удержания фосфора; K_B – коэффициент водообмена водоема, $год^{-1}$; h – глубина водоема, $м$.

Тогда внутреннюю нагрузку ($LP_{внут}$) можно рассчитать при известной концентрации фосфора в водоеме. Но в этом случае величина R должна характеризовать осаждение фосфора, поступающего в водоем только из внешних источников. При оценках суммарных величин притока и стока фосфора разделить внешние

и внутренние его источники в водоеме невозможно. Поэтому Дж. Нюрнберг предложил для оценки величины R использовать эмпирическую формулу, полученную им по расчетам фосфорного баланса только в нестратифицированных, малопродуктивных озерах, где внутренняя нагрузка, по мнению автора, пренебрежимо мала. Эта формула имеет вид:

$$R = \frac{15}{18 + h \cdot K_B} \quad (2)$$

Проведенные автором формулы расчеты показали небольшую чувствительность их результатов к эмпирическим оценкам величины удержания фосфора для одного конкретного озера. В таких расчетах, по-видимому, большое значение имеет надежность оценки среднесуточной концентрации фосфора в водоеме и его концентрации в притоке, которая может быть обеспечена только очень частыми регулярными наблюдениями за концентрациями биогенных веществ как в самом водоеме, так и в его притоках.

Еще один способ расчета, основанный на уравнении Р. Фолленвейдера, рассмотрен в работе Е. Уэлча и Г. Кука [Welch, Cooke, 1996].

Если балансовое уравнение Р. Фолленвейдера представить с учетом внутренней нагрузки в виде

$$W \frac{dP}{dt} = \frac{LP_{внеш}}{h} - K_B \cdot P - K_S \cdot W \cdot P + \frac{LP_{внут}}{h}, \quad (3)$$

где W – объем водоема, м³; K_S – коэффициент седиментации фосфора, год⁻¹ (остальные обозначения те же, что и в уравнении (1)), то при наличии известных значений K_S можно рассчитать величину концентрации фосфора P по интервалам времени. Тогда, сопоставив результаты расчета концентрации фосфора с измеренными ее значениями, величину $LP_{внут}$ можно откалибровать. Пример оценки внутренней биогенной нагрузки с применением такой калибровки приведен в работе В. Перкинса с соавторами [Perkins et al., 1997] для озера Саммамиш (Южная Африка). Сложности такого расчета очевидны – результаты оказываются очень чувствительны к измеренным значениям коэффициента седиментации и величине средней концентрации фосфора в озере. Приведенный пример относится к хорошо изученному озеру и является пока единственным случаем реализации подобной методики оценки внутренней нагрузки.

Преимущества рассмотренных балансовых методов состоят в простоте расчетов, а недостатки – в необходимости использовать очень надежные данные мониторинга биогенных веществ водоема.

Расчет выноса биогенных веществ по балансу потоков в донных отложениях

Метод предложен в Институте озероведения РАН Н. В. Игнатъевой [1997, 2002]. В основе метода – баланс основных потоков вещества на границе раздела вода-дно. При этом используется предположение о наличии слоев отложений, обладающих определенными признаками функционирования экосистемы водоема, которое было высказано Э. Науманном еще в начале 30-х годов прошлого века.

За активный слой принимается верхний, примерно 10–15-см слой осадка, активно участвующий в обменных процессах. Поток захоронения оценивается по концентрации биогенного элемента в слое глубже 15 см, в котором предполагается стабилизация содержания фосфора.

Величина внутренней нагрузки биогенного элемента (фосфора и азота) из донных отложений в воду (J) оценивается как разность между потоком седиментации на поверхность донных отложений (S) и потоком захоронения в толще осадка (B):

$$J = S - B. \quad (4)$$

Расчет потоков седиментации и захоронения биогенных элементов выполняется по формуле:

$$S, B = \frac{TP(TN)_x \cdot V_{oc} \cdot d \cdot (1-p) \cdot 10^3}{365}, \quad (5)$$

где S – плотность потока седиментации фосфора (азота) на поверхность донных отложений, мг $P(N)$ м⁻² сут⁻¹; B – плотность потока захоронения фосфора (азота) в донных отложениях, мг $P(N)$ м⁻² сут⁻¹; $TP(TN)_x$ – содержание общего фосфора (азота) на глубине x в осадке, мг $P(N)$ г⁻¹ (сухого осадка), $x = 0$ см при расчете потока седиментации, то есть поверхностный слой осадка толщиной от 0 до 0,2 см, $x = 10–15$ см – нижняя граница «активного» слоя, которая определяется по характеру вертикального распределения биогенного элемента в колонке донных отложений; V_{oc} – скорость осадконакопления, мм год⁻¹; d – удельная масса сухого осадка, г см⁻³; p – пористость осадка.

Данный метод был успешно применен для оценки внутренней биогенной нагрузки на Ладожское озеро, а также в Онежском озере [Белкина, 2005] и озерах Карелии [Белкина, 2011]. Наиболее детальные расчеты внутренней нагрузки выполнены этим методом для Псковско-Чудского озера [Игнатъева, 2014].

Примерно такой же принцип оценки внутренней нагрузки, основанный на определении

соотношений концентраций фосфора в различных слоях, реализован в расчетах потоков фосфора из донных отложений в водоемах Чувашии [Осмелкин, 2018]. Соотношение концентраций позволяет оценить величину поступления и аккумуляции фосфора в водоеме, а оценка выноса его из донных отложений определяется по разности этих потоков. Преимущество метода состоит в простоте и наглядности расчетов.

Расчет биогенной нагрузки по уравнению Фика

Теоретически диффузионное перемещение растворенных веществ в донных отложениях подчиняется первому закону Фика:

$$J = -D \cdot \frac{dC}{dx}, \quad (6)$$

где J – величина диффузионного потока, $\text{г м}^{-2} \text{сут}^{-1}$; C – концентрация биогенного элемента, г м^{-3} ; D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2 \text{сут}^{-1}$.

Концентрации азота и фосфора в поровом растворе донных отложений определяются скоростью минерализации органических веществ в донных отложениях. В случае, когда концентрацией соединения в природной воде по сравнению с ее концентрацией в поровом растворе можно пренебречь, градиент концентрации может приниматься равным по величине концентрации вещества в поровом растворе. Коэффициент диффузии зависит от многих разнообразных факторов: диаметра и длины пор, температуры, заряда и массы. Сложность его надежной оценки существенно ограничивает практическое применение этого метода, несмотря на его строгую физическую обоснованность. Некоторые значения коэффициентов диффузии приводятся в монографии С. И. Кузнецова [1970], но, как правило, эти значения берутся из работы В. Ли и С. Грегори [Li, Gregory, 1974]. Иногда для расчетов выноса используется величина коэффициента диффузии, полученная для морских илов. Этот метод расчета по уравнению Фика был успешно использован для определения внутренней биогенной нагрузки Таганрогского залива Азовского моря [Жидкова, Гусакова, 2017], но в целом примеров расчета потоков биогенных веществ из донных отложений в литературе немного.

Расчет поступления биогенных веществ по эмпирическим зависимостям

Для оценки внутренней нагрузки предпринимались попытки использовать простейшие методы эмпирических зависимостей. Ме-

тод, предложенный Е. В. Неверовой-Дзиопак [2003], относится только к выносу из донных отложений минерального азота. Этот метод основан на использовании установленной зависимости интенсивности потока минерального азота от весового отношения концентрации углерода к концентрации азота C/N . Чем ниже отношение, тем больший процент в продуктах распада органических веществ составляет аммонийный азот NH_4^+ , т. е. величина потока азота из донных отложений в воду возрастает с уменьшением отношения C/N . Экспериментальные данные были аппроксимированы автором метода линейным уравнением:

$$J_N = 122.5 - 7.82 \cdot \frac{C}{N}, \quad (7)$$

где J_N – поток азота из донных отложений, $\text{мг м}^{-2} \text{сут}^{-1}$.

Случаи применения этого метода, за исключением авторских экспериментов и расчетов, в литературе отсутствуют. Для подтверждения адекватности расчетов по уравнению весьма желательна верификация метода с использованием данных прямых измерений потоков азота.

Представляет некоторый интерес пример расчета потока фосфора из донных отложений рыбоводного пруда по эмпирической зависимости между внутренней и внешней нагрузкой, полученной М. В. Мартыновой [Власов, 2004]. Ориентировочность таких оценок очевидна, т. к. эта зависимость носит иллюстративный, а не расчетный характер.

Расчет выноса биогенных веществ по имитационным гидроэкологическим моделям водоема

Практически все современные модели экологических процессов в экосистемах водоемов при описании круговорота биогенных веществ содержат алгоритм расчета выноса моделируемой переменной (минеральные соединения биогенных веществ) из донных отложений. Применяемые формулы расчета потоков из донных отложений характеризуются большим разнообразием. Оценка коэффициентов формул проводится в процессе процедуры калибровки модели. Однако при надежной верификации модели появляется возможность модельного расчета как интегральной оценки интенсивности внутренней нагрузки, так и ее пространственно-временного распределения в водоеме. Многочисленные примеры расчета интенсивности потоков фосфора из донных отложений различных водоемов можно найти в работах А. В. Леонова, применяющего раз-

работанную им модель CNPSi для расчета гидроэкологического режима водоемов [Леонов, Пищальник, 2012]. Расчет многолетних изменений потоков фосфора из донных отложений водохранилища реализован в гидроэкологической модели ГМВ-МГУ на примере Можайского водохранилища [Гидроэкологический..., 2015]. Модельный подход следует считать наиболее перспективным направлением в исследовании роли внутренней нагрузки. Однако при известной сложности построения имитационных экологических моделей адекватность расчетов по ним в значительной степени зависит от надежности калибровки, верификации модели. Кроме того, успешность модельных расчетов связана с необходимостью накопления детальной информации о состоянии водоема, и в частности об обменных процессах на границе вода-дно.

Оценка роли внутренней нагрузки в процессах эвтрофирования водохранилищ

М. В. Мартыновой предложен метод оценки значимости внутренней нагрузки в экосистеме водоема. Главные факторы, контролирующие внутреннюю биогенную нагрузку водоемов: увеличение первичной продуктивности водоема и изменение кислородного режима [Мартынова, 2010].

Первый фактор приводит к нелинейному увеличению накопления органического вещества на дне, что проявляется в возрастании его содержания в донных отложениях и обогащении поровых растворов илов подвижными минеральными формами биогенных веществ при его деструкции. Второй фактор связан с резким возрастанием потоков фосфора из донных отложений при возникновении анаэробных условий и изменении окислительно-восстановительного потенциала среды. Совместное действие этих факторов обуславливает увеличение роли внутренней биогенной нагрузки при росте трофического состояния водоема в процессе эвтрофирования.

В качестве критериев значимости внутренней нагрузки в экосистеме водоема рассматривается показатель, основанный на сопоставлении потока соединений биогенных веществ со дна (с учетом времени водообмена) с запасом их в водной массе. Эта характеристика показывает относительный вклад биогенных веществ отложений в водную массу и рассчитывается по формуле:

$$\varphi = \frac{L \cdot S \cdot t}{M}, \quad (8)$$

где L – плотность потока биогенных элементов со дна, т км⁻² год; S – площадь дна водоема, км²; t – время водообмена, год; M – запас соединений элемента в водной массе, т.

Эту оценку следует рассматривать как приближенную из-за значительных колебаний запаса фосфора в водной массе в различные годы и невысокой точности расчета этой величины. Основная проблема при использовании метода состоит в сложности оценок параметров расчетной формулы.

В целом выбор метода оценки интенсивности внутренней биогенной нагрузки водоема определяется в первую очередь формулировкой цели и задач исследования и зависит от необходимой точности оценок. Достаточно высокая точность расчетов может быть достигнута экспериментальными методами, однако их применение сопряжено с необходимостью организации специальных полевых и лабораторных исследований. Балансовые методы перспективны при наличии детальной информации о водном объекте, которая может быть получена при реализации специальных программ мониторинга его экологического состояния.

Литература

- Белкина Н. А. Ретроспективная оценка донных отложений Кондопожской губы Онежского озера // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 6. С. 689–699.
- Белкина Н. А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 35–41.
- Бреховских В. Ф., Гашкина Н. А., Ломова Д. В., Шакирова Е. Р. Влияние степени наполнения долинового водохранилища на интенсивность процессов, происходящих на границе раздела вода-донные отложения // Вод. ресурсы. 1999. Т. 26, № 1. С. 55–59.
- Власов Б. П. Антропогенная трансформация озер Беларуси: геоэкологическое состояние, изменение, прогноз. Минск: БГУ, 2004. 207 с.
- Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз) / Ред. К. К. Эдельштейн. М.: Перо, 2015. 286 с.
- Даценко Ю. С. Балансовая оценка выноса фосфора из донных отложений Можайского водохранилища // Водные ресурсы. 1998. Т. 25(4). С. 507–509.
- Жидкова А. Ю., Гусакова Н. В. Оценка внутренней биогенной нагрузки на воды Таганрогского залива Азовского моря с позиции эвтрофирования // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы». 2017. Т. 4, № 4. 10 с.
- Жукова Т. В., Мартынова М. В., Жуков Э. П. Донные отложения в системе Нарочанских озер. 1. Внутренняя биогенная нагрузка // Водные ресурсы. 1990. № 2. С. 130–138.
- Игнатьева Н. В. Фосфор в донных отложениях и фосфорный обмен на границе вода-дно в Ладож-

ском озере: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 1997. 24 с.

Игнатьева Н. В. Роль донных отложений в круговороте фосфора в озерной экосистеме // Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука, 2002. С. 148–156.

Игнатьева Н. В. Оценка потоков фосфора в пограничной зоне осадков – вода в Псковско-Чудском озере // Ученые записки РГМУ. 2014. № 34. С. 71–78.

Кузнецов С. И. Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность. Л.: Наука, 1970. 318 с.

Леонов А. В., Пищальник В. М. Моделирование природных процессов в водной среде. Теоретические основы. Южно-Сахалинск: СахГУ, 2012. 227 с.

Лозовик П. А. Взаимодействие донных отложений северного Выгозера с водой // Органическое вещество и биогенные элементы в водах Карелии. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1985. С. 61–74.

Мартынова М. В. Донные отложения как источник азота и фосфора в водоеме. Обзор // Водные ресурсы. 1981. № 1. С. 164–182.

Мартынова М. В. Состояние и основные направления исследований обмена азотом и фосфором между донными отложениями и водой // Взаимодействие между седиментами в озерах и водохранилищах. Л.: Наука, 1984а. С. 139–146.

Мартынова М. В. Азот и фосфор в донных отложениях озер и водохранилищ. М.: Наука, 1984б. 159 с.

Мартынова М. В. Закономерности процессов накопления, трансформации и выделения со дна водоемов соединений азота и фосфора: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Ростов-на-Дону, 1988. 47 с.

Мартынова М. В. Донные отложения как составляющая лимнических экосистем. М.: Наука, 2010. 242 с.

Мартынова М. В., Козлова Е. И. Фосфор в донных отложениях двух высокотрофных озер // Водные ресурсы. 1987. № 2. С. 103–112.

Мартынова М. В., Ломова Д. В., Кременецкая Е. Р. Роль Fe и Mn в циклах C, N, S, и P в морских и пресноводных отложениях. М.: ИПХФ РАН, 2017. 130 с.

Мизандронцев И. Б. Химические процессы в донных отложениях водоемов. Новосибирск: Наука, 1990. 176 с.

Неверова-Дзюпак Е. В. Теоретическое, методологическое и инженерное обеспечение охраны поверхностных вод от антропогенного эвтрофирования: Дис. ... докт. техн. наук. СПб., 2003. 345 с.

Осмелкин Е. В. Закономерности осадконакопления в водоемах Чувашской республики: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Казань, 2018. 23 с.

Романенко В. И., Кузнецов С. И. Экология микроорганизмов пресных водоемов. Л.: Наука, 1974. 194 с.

Li W. C., Gregory S. Diffusion of ions in sea water and in deep sea sediments // Geochim. Cosmochim. Acta. 1974. Vol. 38. P. 703–714.

Nurnberg G. K. The prediction of internal phosphorus load in lakes with anoxic hypolimnia // Limnol. Oceanogr. 1984. Vol. 29. P. 111–124.

Perkins W. W., Welch E. B., Frodge J., Hubbard T. A zero degree of freedom total phosphorus model. 2. Application to Lake Sammamish, Washington // Lake Reserv. Manage. 1997. Vol. 13. P. 131–141.

Vollenwaider R. A. Input-output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology // Schweizerische Zeitschrift fur Hydrologie. 1975. Vol. 37. P. 53–84.

Welch E. B., Cooke G. D. Internal phosphorus loading in shallow lakes: Importance and control // Lake Reserv. Manage. 1996. Vol. 11. P. 273–281.

Поступила в редакцию 08.04.2019

References

Belkina N. A. Retrospektivnaya otsenka donnykh otlozhenii Kondopozhskoi guby Onezhskogo ozera [Retrospective assessment of bottom deposits in Kondopoga Bay, Lake Onega]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 2005. Vol. 32, no. 6. P. 689–699.

Belkina N. A. Rol' donnykh otlozhenii v protsessakh transformatsii organicheskogo veshchestva i biogenykh elementov v ozernykh ekosistemakh [The role of bottom sediments in the transformation of organic matter and nutrients in lake ecosystems]. *Tr. KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2011. No. 4. P. 35–41.

Brekhovskikh V. F., Gashkina N. A., Lomova D. V., Shakirova E. R. Vliyaniye stepeni napolneniya dolinnogo vodokhranilishcha na intensivnost' protsessov, proiskhodyashchikh na granitse razdela voda-donnyye otlozheniya [The influence of filling rate in the valley reservoir on the intensity of the processes at the water-bottom sediments border]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 1990. Vol. 26, no. 1. P. 55–59.

Datsenko Y. S. Balansovaya otsenka vynosa fosfora iz donnykh otlozhenii Mozhaiskogo vodokhranilishcha [Balance assessment of phosphorus removal from bot-

tom sediments of the Mozhaisk reservoir]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 1998. Vol. 25, no. 4. P. 507–509.

Gidroekologicheskii rezhim vodokhranilishch Podmoskov'ya [Hydrological regime of Moscow region reservoirs (observations, diagnostics, prediction)]. Moscow: Pero, 2015. 286 p.

Ignat'eva N. V. Fosfor v donnykh otlozheniyakh i fosfornyi obmen na granitse voda-dno v Ladozhskom ozere [Phosphorus in bottom sediments and phosphorus exchange at the water-bottom border in Lake Ladoga.]: Summary of PhD (Cand. of Geogr.) thesis. Limnology Inst. RAS. St. Petersburg, 1997. 24 p.

Ignat'eva N. V. Rol' donnykh otlozhenii v ozernoi ekosisteme [The role of bottom sediments in the phosphorus cycle in the lake ecosystem]. *Ladozhskoe ozero – proshloe, nastoyashchee i budushchee* [Lake Ladoga – past, present, and future]. St. Petersburg: Nauka, 2002. P. 148–156.

Ignat'eva N. V. Otsenka potokov fosfora v pogranichnoi zone osadok – voda v Pskovsko-Chudskom ozere [Estimation of phosphorus fluxes in the sediment – water boundary zone in Lake Peipsi]. *Uchenye zapiski RGGMU*

[Proceed. Russ. State Hydrometeorological Univ.]. 2014. No. 34. P. 71–78.

Kuznetsov S. I. Mikroflora ozer i ee geokhimičeskaya deyatel'nost' [Lake microflora and its geochemical activity]. Leningrad: Nauka, 1970. 318 p.

Leonov A. V., Pishchal'nik V. M. Modelirovanie prirodnykh protsessov v vodnoi srede. Teoreticheskie osnovy [Modeling of natural processes in the aquatic environment. Theoretical basis]. Yuzhno-Sakhalinsk: SakhGU, 2012. 227 p.

Lozovik P. A. Vzaimodeistvie donnykh otlozhenii severnogo Vygozera s vodoi [The interaction of the bottom sediments with water in northern Vygozero]. *Organicheskoe veshchestvo i biogennye elementy v vodakh Karelii* [Organic matter and biogenic elements in the waters of Karelia]. Petrozavodsk, 1985. P. 61–74.

Martynova M. V. Donnye otlozheniya kak istochnik azota i fosfora v vodoeme. Obzor. [Bottom sediments as a source of nitrogen and phosphorus in the reservoir: an overview]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 1981. No. 1. P. 164–182.

Martynova M. V. Sostoyanie i osnovnye napravleniya issledovaniy obmena azotom i fosforom mezhdru donnymi otlozheniyami i vodoi [State and main areas of research on the exchange of nitrogen and phosphorus between bottom sediments and water]. *Vzaimodeistvie mezhdru sedimentami v ozerakh i vodokhr.* [Interaction between sediments in lakes and reservoirs]. Leningrad: Nauka, 1984a. P. 139–146.

Martynova M. V. Azot i fosfor v donnykh otlozheniyakh ozer i vodokhranilishch [Nitrogen and phosphorus in bottom sediments of lakes and reservoirs]. Moscow: Nauka, 1984b. 159 p.

Martynova M. V. Zakonomernosti protsessov nakopleniya, transformatsii i vydeleniya so dna vodoemov soedinenii azota i fosfora [Patterns of accumulation, transformation and excretion of nitrogen and phosphorus compounds from water bodies bottoms]: Summary of PhD (Dr. of Geogr.) thesis. Rostov-on-Don, 1988. 47 p.

Martynova M. V. Donnye otlozheniya kak sostavlyayushchaya limnicheskikh ekosistem [Bottom sediments as a component of limnic ecosystems]. Moscow: Nauka, 2010. 242 p.

Martynova M. V., Kozlova E. I. Fosfor v donnykh otlozheniyakh dvukh vysokotrofnykh ozer [Phosphorus in bottom sediments of two high-trophic lakes]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 1987. No. 2. P. 103–112.

Martynova M. V., Lomova D. V., Kremenetskaya E. R. Rol' Fe i Mn v tsiklakh C, N, S, i P v morskikh i presnovodnykh otlozheniyakh [The role of Fe and Mn in C, N, S, and P cycles in marine and freshwater sediments]. Moscow: IPKhF RAN, 2017. 130 p.

Mizandronev I. B. Khimicheskie protsessy v donnykh otlozheniyakh vodoemov [Chemical processes

in bottom sediments of water bodies]. Novosibirsk: Nauka, 1990. 176 p.

Neverova-Dziopak E. V. Teoreticheskoe, metodologicheskoe i inzhenernoe obespechenie okhrany poverkhnostnykh vod ot antropogennogo evτροφirovaniya [Theoretical, methodological, and engineering support for protecting surface waters from anthropogenic eutrophication]: DSc (Dr. of Tech.) thesis. St. Petersburg, 2003. 345 p.

Osmelkin E. V. Zakonomernosti osadkonakopleniya v vodoemakh Chuvashskoi respubliki [Patterns of sedimentation in the reservoirs of the Chuvash Republic]: Summary of PhD (Cand. of Geogr.) thesis. Kazan', 2018. 23 p.

Romanenko V. I., Kuznetsov S. I. *Ekologiya mikroorganizmov presnykh vodoemov* [Ecology of freshwater microorganisms]. Leningrad: Nauka, 1974. 194 p.

Vlasov B. P. Antropogennaya transformatsiya ozer Belarusi – geokologicheskoe sostoyanie, izmenenie, prognoz [Anthropogenic transformation of the lakes of Belarus: geoecological state, changes, forecast]. Minsk: BGU, 2004. 207 p.

Zhidkova A. Y., Gusakova N. V. Otsenka vnutrennei biogennoi nagruzki na vody Taganrogskogo zaliva Azovskogo morya s pozitsii evτροφirovaniya [Assessment of the internal nutrient load on the waters of the Taganrog Bay of the Sea of Azov in view of eutrophication]. *Internet-zhurn. «Otkhody i resursy»* [Russ. J. Res., Conservation, and Recycling]. 2017. Vol. 4, no. 4. 10 p.

Zhukova T. V., Martynova M. V., Zhukov E. P. Donnye otlozheniya v sisteme Narochanskikh ozer. 1. Vnutrennyaya biogennaya nagruzka [Bottom sediments in the system of the Naroch lakes. 1. Internal nutrient load.]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 1990. No. 2. P. 130–138.

Li W. C., Gregory S. Diffusion of ions in sea water and in deep sea sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1974. Vol. 38. P. 703–714.

Nurnberg G. K. The prediction of internal phosphorus load in lakes with anoxic hypolimnia. *Limnol. Oceanogr.* 1984. Vol. 29. P. 111–124.

Perkins W. W., Welch E. B., Frodge J., Hubbard T. A zero degree of freedom total phosphorus model. 2. Application to Lake Sammamish, Washington. *Lake Reserv. Manage.* 1997. Vol. 13. P. 131–141.

Vollenwaider R. A. Input-output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology. *Schweizerische Zeitschrift fur Hydrologie*. 1975. Vol. 37. P. 53–84.

Welch E. B., Cooke G. D. Internal phosphorus loading in shallow lakes: Importance and control. *Lake Reserv. Manage.* 1996. Vol. 11. P. 273–281.

Received April 08, 2019

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Даценко Юрий Сергеевич
профессор каф. гидрологии суши географического
факультета, д. г. н.
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова
Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991
эл. почта: yuri0548@mail.ru
тел.: (495) 9395470

CONTRIBUTOR:

Datsenko, Yury
Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia
e-mail: yuri0548@mail.ru
tel.: (495) 9395470