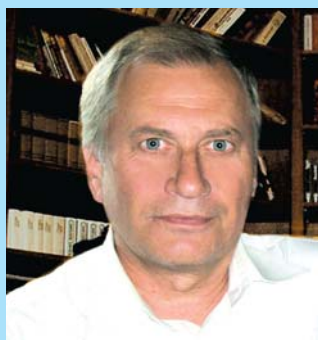


ТЕХНОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ОЗЕРНЫХ СИСТЕМ ВАЛДАЙСКОГО РЕГИОНА

© 2010 г. В.Е. Путырский, В.Л. Злобина

Институт водных проблем Российской академии наук, Москва

Ключевые слова: донные отложения, экспериментальные данные, миграция, дисперсия, концентрация.



В.Е. Путырский



В.Л. Злобина

На примере нескольких озерных систем Валдайской возвышенности (озера Валдайское, Ужин, Борое, Долгое, Брезгово, Короцкое) исследованы их гидрогеохимические особенности. Рассмотрены последствия закисления озерных вод и проанализированы особенности миграции некоторых токсикантов с учетом загрязнения донных отложений. Предложена методика количественной оценки коэффициента диффузионной дисперсии путем аппроксимации экспериментальных данных о вертикальном распределении в донных отложениях концентраций техногенных примесей.

Введение

Известно, что озерные системы относятся к сложным элементам гидросферы [1—6]. Их функционирование обусловлено комплексом разнообразных природных и техногенных факторов (климатические, географические, ландшафтные, гидрологические, геолого-структурные, гидрогеологические и др.). Они участвуют в формировании водного баланса, определяют интенсивность водообмена, а также особенности гидрохимического режима озерных вод и геохимических свойств донных отложений.

Водное хозяйство России № 5, 2010

Водное хозяйство России

В гумидной зоне европейской России располагается огромное количество озерных систем различного генезиса [4, 7]. Наибольшее распространение получили озерные системы моренного типа, сформированные в котловинах ледникового происхождения.

Под влиянием антропогенных факторов в геохимии озерных систем важное значение приобретает воздействие других генетических типов природных вод [1, 2, 4, 5, 8, 9]. Особенно уязвимыми становятся озерные воды в условиях многолетнего воздействия рассредоточенных и локальных источников загрязнения [3—5, 7]. Динамичное изменение качества поверхностных вод (включая озерные системы) и загрязнение донных отложений стало одной из актуальных экологических проблем в различных регионах мира [4—6, 10—12].

Уже установлено, что состояние донных отложений озер отражает степень антропогенного воздействия на водосборы, примыкающие к акваториям озерных котловин. При масштабном закислении атмосферных осадков наблюдается особенно быстрое изменение геохимии озерных систем в ряде районов мира [3—5, 9]. Явными признаками проявления таких процессов являются весьма низкие величины нейтрализующей емкости озерных вод (АНС) и даже их отрицательные величины [5, 6]. Показатель АНС характеризует степень изменения баланса эквивалентов анионов и катионов в анализируемой воде и определяется по концентрациям основных макроэлементов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , NO_3^-). Отрицательные значения данного параметра указывают на проявление процессов закисления не только в озерных водах, но и на примыкающих водосборах. Усиление выщелачивания в водовмещающих породах на водосборе отражалось на состоянии донных отложений. А именно, за счет интенсификации этих процессов в водовмещающих породах повышаются концентрации ряда токсичных элементов (Al^{3+} , Pb , Zn , Cu , Ni и др.) в донных отложениях.

Повсеместное изменение свойств озерных систем отмечается также в странах западной Европы и в различных регионах Российской Федерации [3—5]. Например, в районе Кольского полуострова около 64 % озерных систем находятся почти в критическом состоянии. Изучение состояния озер в Ярославской и Вологодской областях также выявило региональное изменение свойств озерных вод только за счет загрязнения атмосферных выпадений [3, 4]. Обобщение опубликованных данных показало, что ухудшение свойств озерных вод проявилось, с одной стороны, в уменьшении концентраций ряда химических ингредиентов (рН, HCO_3^- , Ca^{2+} и др.), а с другой — в значительном увеличении концентраций SO_4^{2-} [3, 4].

На основе перечисленных научных фактов представляется весьма актуальным исследование особенностей техногенной трансформации озерных систем, имеющих различные морфологические и морфометрические пока-

затели, включая интенсивность водообмена и объемы аккумулированной воды. Необходимость изучения гидрогеохимических свойств озерных систем обосновывается также тем, что озерные воды являются одной из основных водно-балансовых составляющих эксплуатируемых водоносных горизонтов. Поэтому ухудшение качества озерных вод и загрязнение донных отложений может способствовать активизации нежелательных процессов в водоносных системах и ухудшению характеристик питьевой воды.

Методы и постановка исследований

Исследования выполнялись для нескольких озерных систем Валдайской возвышенности (озера Борое, Долгое, Брезгово, Короцкое, Ужин и Валдайское) в течение 1987—2007 гг.

Валдайская возвышенность расположена в зоне смешанных лесов и характеризуется чередованием холмов и сильно заболоченных водосборов. Переувлажнение территории обусловлено в первую очередь атмосферными осадками. В отдельные годы их количество превышает 700—800 мм. Четвертичные отложения сплошным чехлом покрывают размытую поверхность пород палеозойского возраста, представленных закарстованными известняками и доломитами.

На рис. 1 приведена схема расположения изучаемых озер и некоторые их характеристики. Из приведенной схемы видно, что все озера приурочены к различным гипсометрическим отметкам (от 218 до 178 м). Рассматриваемые озера имеют различные глубины, площадь зеркала $S_{\text{зерк}}$ и площадь водосбора $F_{\text{водосб}}$ (табл. 1). Среди изучаемых озер Валдайское имеет самую большую площадь зеркала, глубину и аккумулированные объемы воды. Для Валдайского озера характерно наибольшее время водообмена (около 10 лет).

Из приведенных данных также следует, что наименьшие значения величины $S_{\text{зерк}}/F_{\text{водосб}}$ характерны для озер Борое (4,65) и Валдайское (4,17), а наибольшие — для оз. Брезгово (84,5). Эти сведения указывают на значительную роль площади водосбора в формировании гидрогеохимических показателей озерных систем. Таким образом, значительная урбанизация водосбора Валдайского озера заметно ухудшит качество воды и показатели загрязнения донных отложений.

Обобщение многолетних гидрохимических наблюдений, полученных различными организациями и ведомствами (Валдайский филиал ГГИ, Институт удобрений и растениеводства им. Прянишникова и др.) за период с 1958 по 2005 гг., показало, что озерные воды характеризуются небольшой величиной минерализации (от 95 до 195 мг/л). Они содержат небольшие концентрации HCO_3^- (39—120 мг/л), Ca^{2+} (14—34 мг/л), Mg^{2+} (4,0—9,1 мг/л). Установлено также, что в оз. Валдайское

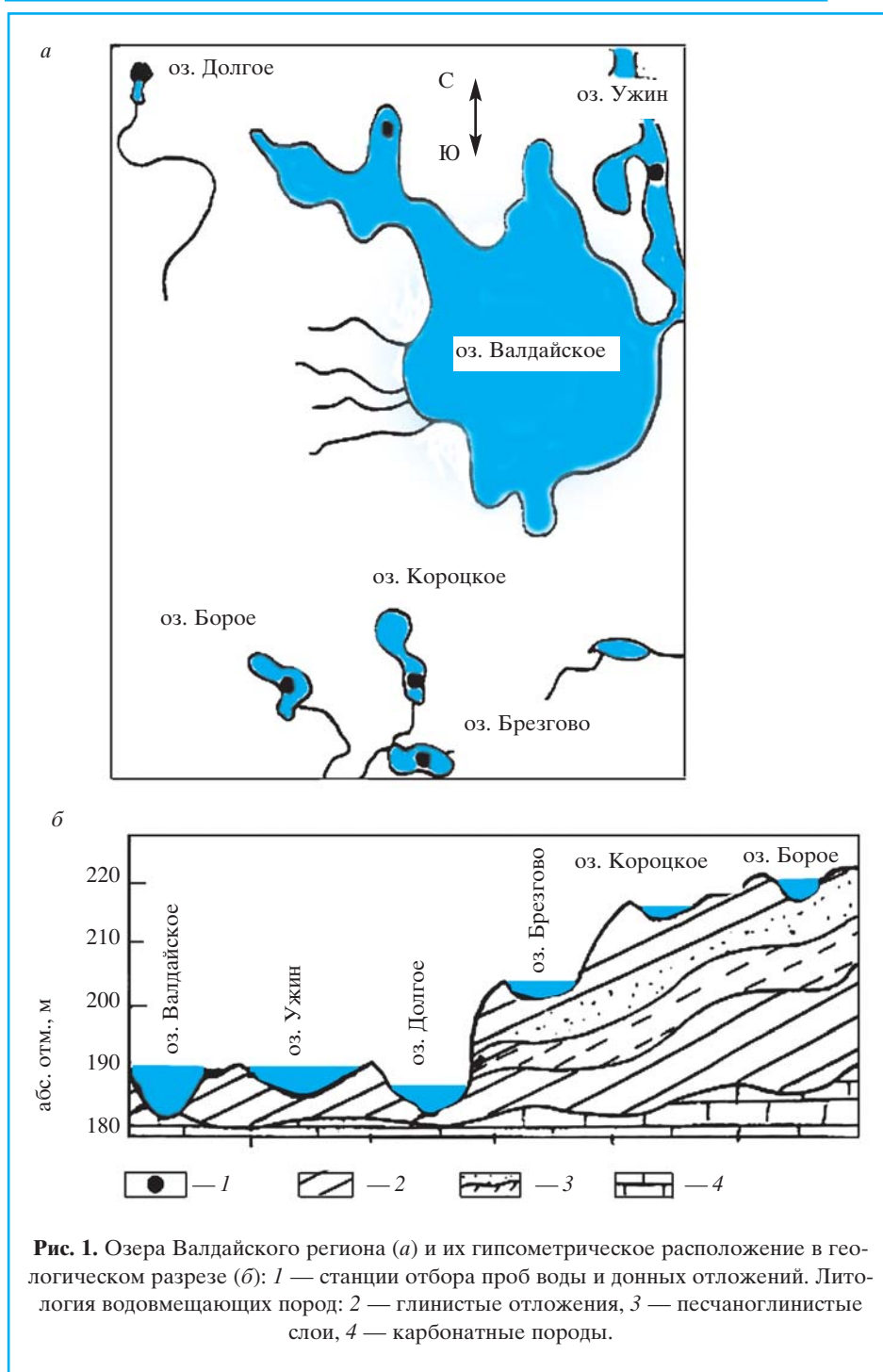


Таблица 1. Значения величины нейтрализующей емкости для озерных систем Валдайской возвышенности

Параметры	Название озера					
	Валдайское	Ужин	Долгое	Брезгово	Короцкое	Борое
Площадь зеркала, м ²	21,6	8,74	0,16	0,32	0,62	0,69
Средняя глубина, м	16,1	15,1	1,5	4,2	2,7	4,5
Время водообмена, год	9,8	6,1	0,08	0,15	0,9	2,5
Отношение $S_{\text{зерк}}/F_{\text{водосб}}$	4,17	6,48	—	84,5	9,54	4,65

в период 1951—2005 гг. концентрации SO_4^{2-} возросли от 5,7—6,1 до 23—27 мг/л, хотя значения рН изменяются от 7,7 (в летний период времени) до 7,12 (в зимний период времени). Более низкие значения рН отмечаются в придонном слое (6,32—6,74).

Для естественных условий по доминирующим ионам состав озерных вод характеризовался HCO_3 —Ca типом. С загрязнением озер отмечалось постоянное увеличение концентраций отдельных химических элементов (SO_4^{2-} , Na(+), Cl(-)). Поэтому стали появляться воды HCO_3 —Na и даже до SO_4 —Na типов.

Выполненные исследования показали, что гидрохимический состав озерных вод весьма существенно связан с гидрологическим режимом озер, а также с геохимическими процессами на водосборах озер. Моделирование процессов загрязнения на водосборах Валдайской возвышенности выявило существенную роль разгрузки подземных вод в формировании гидрохимии озерных систем [3, 4].

Наибольшие величины минерализации воды и концентрации отдельных химических элементов характерны для зимнего периода времени. В гидрохимическом составе озерных вод наблюдается четкая стратификация по глубине в изменении щелочно-кислотных и окислительно-восстановительных условий, включая концентрации отдельных ингредиентов. Во всех озерах отмечалось уменьшение рН (от слабощелочных до слабокислых условий) и увеличение концентраций ряда макроэлементов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Na(+)) и др.). С глубиной отбора проб заметно возрастала электропроводность воды и ее цветность. Этот эффект для многих озер связан с разгрузкой подземных вод, а также притоком поверхностных вод различного генезиса (речных и болотных) [4, 8]. Поэтому при изучении гидрохимии озер пробы воды отбирались у дна и с поверхности.

В табл. 2 приведены значения величины нейтрализующей емкости (ANC) для рассмотренных озерных систем, а в табл. 3 — результаты

Таблица 2. Значения величины нейтрализующей емкости (АНС) для озерных систем Валдайской возвышенности

Параметры	Название озера					
	Борое	Короцкое	Брезгово	Долгое	Ужин	Валдайское
Величина нейтрализующей емкости, 10^{-4} мэкв/л	3,77	11,6	8,5	17,8	9,91	12,35
Отношение $S_{\text{зерк}}/F_{\text{водосб}}$	4,65	9,54	84,5	—	6,48	4,17

термодинамического моделирования, характеризующие степень влияния щелочно-кислотных условий на усиление выщелачивания основных породообразующих минералов палеозойских отложений, в которые врезаются некоторые озерные системы.

Формирование агрессивных озерных вод может негативно сказаться на активизации карстовых процессов в карбонатных породах, из которых производится весьма активный водоотбор. В изучаемом районе многие озера имеют хорошую гидравлическую связь с подземными водами.

Из приведенных данных видно, что наибольшие концентрации SO_4^{2-} характерны для небольших озер (Борое, Короцкое и Брезгово). При этом, в оз. Борое озерные воды по своему составу относились к $\text{SO}_4\text{—Na}$ типу, тогда как в остальных озерах по доминирующим ионам тип вод соответствовал $\text{HCO}_3\text{—Na}$ типу.

Анализ данных табл. 3 показал, что нарушение условий гидрохимического равновесия связано не только с увеличением концентраций SO_4^{2-} и ионов $\text{H}(+)$ в озерных водах. При этом для озер, в меньшей степени связан-

Таблица 3. Значения коэффициентов насыщения ($S_{\text{кальцита}}$ и $S_{\text{доломита}}$) для озер Валдайской возвышенности

Название озера	Концентрации, моль/кг		Коэффициент насыщения	
	$\text{SO}_4^{2-} \cdot 10^{-4}$	$\text{H}(+) \cdot 10^{-8}$	$S_{\text{кальцита}}$	$S_{\text{доломита}}$
Борое	2,68	1,66	−0,77	−0,57
Короцкое	2,14	0,134	0,97	2,74
Брезгово	2,1	0,423	0,34	1,44
Долгое	0,55	5,34	−0,35	−0,54
Ужин	1,34	2,12	−0,18	0,23
Валдайское	1,23	2,11	−0,2	0,1

ных с атмосферным питанием (Короцкое и Брезгово), несмотря на увеличение концентраций SO_4^{2-} в озерных водах не отмечается существенного увеличения ионов H^+ и уменьшения коэффициентов насыщения по кальциту и доломиту.

Анализ динамики изменения гидрохимических равновесий указывает на дальнейшее уменьшение коэффициентов насыщения во времени. Особенно явно смещение динамического равновесия озерных вод наблюдается на границе вода—дно, что свидетельствует об аккумуляции различных токсикантов и степени загрязнения подземных вод, поступающих с водосборов. Аналогичные тенденции были установлены в озерных водах Валдайской возвышенности в Новгородской области в работе [2]. Поэтому для рассматриваемых озер изучались детально донные отложения и механизм их загрязнения.

Исследование донных отложений

Отбор донных отложений осуществлялся сотрудником Валдайского филиала ГГИ И.В. Недогарко по схеме рис. 1. Пробы отбирались для всех станций через 2—3 см. В изучаемых озерных системах мощность донных отложений изменялась от 51—53 до 665 см. Наибольшая мощность донных отложений была отмечена в Валдайском озере. Определения выполнялись на рентгенофлуоресцентном приборе ОРТЭК-ТЭФА-611. В пробах анализировался валовый состав донных отложений (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , MnO , Pb , Zn и др.).

Сопоставление полученных данных для верхних слоев донных отложений (0—3 см) с количественными оценками для нижних слоев (3—100 см) показало, что антропогенное воздействие проявилось в более высоких концентрациях Mn , Fe , Pb и Zn . В табл. 4 приводятся концентрации Pb и Zn в донных отложениях некоторых озер, характеризующие распределение и аккумуляцию токсикантов в верхней и нижней зонах. Из анализа этих данных видно, что загрязнение донных отложений озер в наибольшей степени проявляется по Zn . При этом наиболее динамичная аккумуляция токсикантов отмечалась для оз. Борое, находящегося на самых высоких гипсометрических отметках.

Обобщение данных, характеризующих вертикальное распределение токсикантов в донных отложениях, указывает на убывание их концентраций по мере увеличения мощности. Вполне очевидно, что в наблюдаемых условиях поток примесей направлен в подстилающие слои озерных отложений. Кроме того, выявлен многослойный характер распределения токсикантов в донных отложениях озерных систем.

Таблица 4. Концентрации Pb и Zn в верхней и нижней частях донных отложений

Название озера	Концентрации в верхней части, ppm		Концентрации в нижней части, ppm	
	Pb	Zn	Pb	Zn
Валдайское	77	174	5	54
Короцкое	94	289	30	118
Брезгово	59	194	5	222
Борое	68	214	5	434

Нами проанализированы имеющиеся сведения о миграции и аккумуляции Zn и Pb в придонной области реального водного объекта — Усадьевского залива оз. Валдайское. Для изучения гидрофизических параметров распространения загрязняющих веществ в системе «атмосфера—водоток—донные отложения» сформулирована математическая модель, описывающая динамику взвешенных частиц по вертикали с помощью следующего уравнения переноса:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}, \quad (1)$$

где c — концентрация Zn или Pb (ppm);

z — координата (см), причем $z = 0$ находится на границе вода—донные отложения и ось z направлена вверх;

t — время (год);

D — коэффициент диффузионной дисперсии (см²/год).

Описание процессов распространения примесей выполнялось для реального масштаба времени, соответствующего техногенному загрязнению донных осадков Zn и Pb за 10 лет, то есть на момент получения экспериментальных данных. Для оценки параметров дисперсии в донных отложениях частиц цинка и свинца используем известное одномерное ($-\infty < z < +\infty$) распределение концентрации от мгновенного источника вещества массой M , помещенного в точке $z = 0$.

Решение уравнения (1) имеет вид:

$$c(z, T) = \frac{M}{2\sqrt{\pi DT}} \exp\left(-\frac{z^2}{4DT}\right), \quad R^2 = DT, \quad (2)$$

где R^2 — параметр, характеризующий радиус влияния и имеющий размерность см².

Уравнение (2) удовлетворяет граничному условию

$$c = 0, z \rightarrow -\infty, +\infty$$

и начальному условию, заданному по уровню загрязненности гидросферы.

С помощью решения уравнения (2) были построены теоретические кривые, аппроксимирующие распределения Zn и Pb в донных отложениях озера. При этом подбирались значения R^2 , обеспечивающие наилучшее приближение теоретических кривых к реальным значениям концентраций техногенных примесей, путем численных экспериментов. На рис. 2 приводятся результаты расчетов, характеризующие условия миграции Zn и Pb в донных отложениях оз. Валдайское.

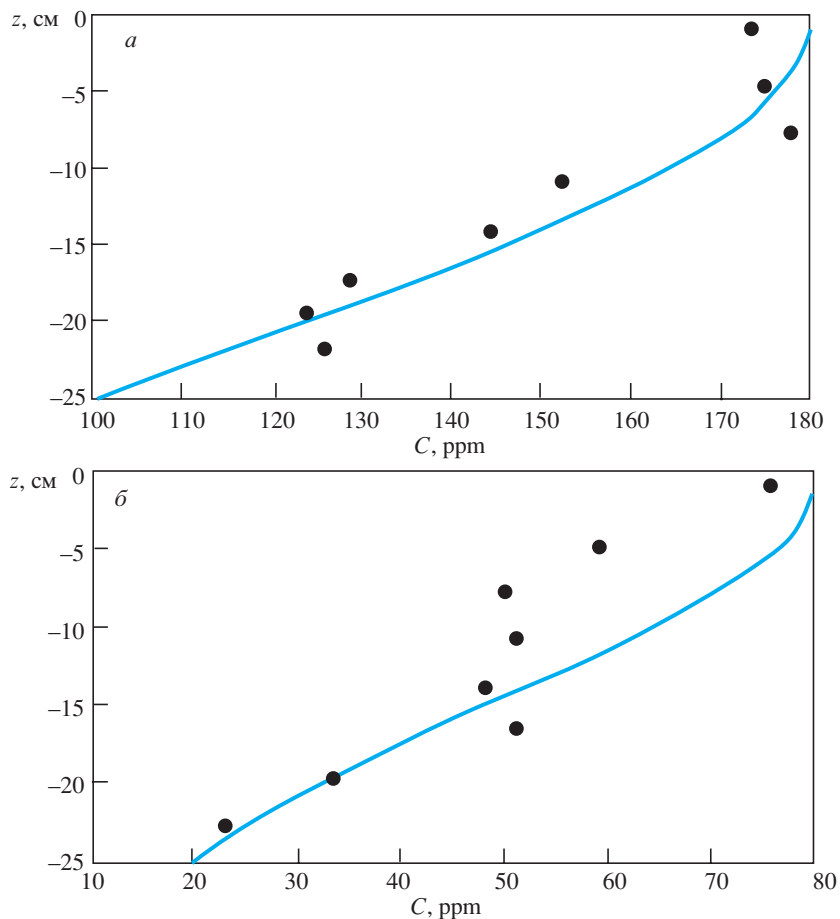


Рис. 2. Расчетные кривые распределения в донных отложениях концентраций цинка (а) и свинца (б), точками обозначены экспериментальные значения.

Наилучшее совпадение экспериментальных и расчетных значений получено для цинка при $R^2 = 270 \text{ см}^2$ и для свинца при $R^2 = 110 \text{ см}^2$. С помощью найденных параметров миграции примесей впервые выполнена количественная оценка коэффициента диффузионной дисперсии в придонной области водоема для района Валдайского национального парка. Рассчитанное значение коэффициента $D = 3 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$.

Учитывая аккумуляционную способность донных отложений к ряду токсикантов, отметим важность полученных результатов для изучения фрагментарного загрязнения подземных вод при их гидравлической связи с поровыми водами донных отложений озерных систем. При неблагоприятных условиях поступления техногенных элементов увеличивается вероятность локального загрязнения подземных вод за счет проникновения токсикантов в эксплуатируемые водоносные горизонты. В дальнейших исследованиях предполагается изучить условия миграции техногенных примесей с учетом процессов химической кинетики.

Выводы

Проведенные исследования установили сложный характер формирования гидрогеохимических свойств озерных систем Валдайской возвышенности за счет процессов взаимодействия внешних и внутренних факторов. Многолетние наблюдения и оценка полученных результатов выявили значительное влияние атмосферных осадков на трансформацию гидрохимического режима и загрязнение донных отложений.

Предложенная методика исследования параметров миграции техногенных элементов на основе использования экспериментальных данных при решении обратных гидродинамических задач применима для других озерных систем и водных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев В.А.* Химический состав природных вод бассейна озера Валдай как фонового для северо-запада ЕТС // Водные ресурсы. 1985. № 5. С. 112—118.
2. *Капотов А.А., Капотова Н.И.* Влияние антропогенных факторов на химический состав поверхностных вод бассейна Валдайского озера // Тр. ГГИ. 1979. Вып. 258. С. 82—87.
3. *Комов В.Т., Лазарева В.И.* Антропогенное закисление малых озер Севера Европейской России // Биол. внутр. вод. 1997. № 3. С. 5—18.
4. *Лазарева В.И., Комов В.Т.* Система водосборов и формирование химического состава малых озер подверженных влиянию закисления // Водные ресурсы. 1998. Т. 25. № 6. С. 683—693.
5. *Моисеев Т.И.* Закисление вод, факторы, механизмы и экологические последствия. М.: Наука, 2003. 276 с.

6. *Kopacek J., Borovec J.* Chemical composition of modern and pre-acidification sediments in the Tatra Mountain lakes // *Biology*. 2006. V. 61. P. 65—76.
7. *Moiseenko T.I.* Acidification and critical loads for surface waters: Kola — Northern Russia // *Ambio*. 1994. V. 23. No. 7. P. 418—424.
8. *Злобина В.Л., Юшманов И.О.* Изучение фронта закисления грунтовых вод на заболоченных водосборах // *Водные ресурсы*. 2003. Т. 30. № 5. С. 1—6.
9. *Путьрский В.Е., Фролов А.П.* Процессы формирования ареалов загрязнений в донных осадках (на примере балтийского побережья Калининградской области) // *Геоэкология*. 2004. № 2. С. 122—129.
10. *Keller W.B., Heneberry J.H., Dixit S.S.* Decreased acid deposition and the chemical recovery of Killarney, Ontario, lakes // *Amdio*. 2003. No. 3. P. 5—18.
11. *Eisma D.* Suspended matter in the aquatic environment. Springer-Verlag, Berlin, 1993. 315 p.
12. *Simons T.J.* Verification of Numerical Models of Lake Ontario // *J. of the Phys. Oceanogr.* 1976. V. 6. P. 372—378.

Сведения об авторах:

Путьрский Владимир Евгеньевич, д. г. н., ведущий научный сотрудник Института водных проблем РАН, 119333, Москва, ул. Губкина, 3; e-mail: putyrsky1@yandex.ru;

Злобина Валентина Леонидовна, д. г-м. н., ведущий научный сотрудник Института водных проблем РАН, e-mail: zlobina45@mail.ru.