научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

https://ecopri.ru **https://petrsu.ru**

Издатель
ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

https://ecopri.ru

№ 2 (36). Июнь, 2020

Главный редактор
А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Э. В. Ивантер
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов
Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. М. Макаров

Редакционная коллегия

Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
J. P. Kurhinen
А. Ю. Мейгал
J. B. Jakovlev
B. Krasnov
A. Gugołek
В. К. Шитиков
В. Н. Якимов

Службы поддержки

А. Г. Марахтанов
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции
185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, ул. Ленина, 33.
E-mail: ecopri@petrsu.ru
https://ecopri.ru

12+

© ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»

научный электронный журнал ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

https://ecopri.ru **https://petrsu.ru**

УДК 546.72:556.16(282.247.211)

МОДЕЛЬ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВ В ВОДАХ ПЕТРОЗАВОДСКОЙ ГУБЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

ТЕКАНОВА Елена Валентиновна	*к. б. н., Институт водных проблем Севера Карельский научный центр РАН (185030, Россия, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, д. 50), etekanova@mail.ru*
КОРОСОВ Андрей Викторович	*д. б. н., Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН (Россия, Республика Карелия, 185030 г. Петрозаводск, пр. Александра Невского, 50), avkorosov@gmail.com*
КАЛИНКИНА Наталия Михайловна	*д. б. н., Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН (Россия, Республика Карелия, 185030 г. Петрозаводск, пр. Александра Невского, 50), cerioda@mail.ru*
ИСАКОВА Ксения Валерьевна	*аспирант, Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН (Россия, Республика Карелия, 185030 г. Петрозаводск, пр. Александра Невского, 50), ksusha_isakova@mail.ru*
РЫЖАКОВ Александр Вадимович	*к. х. н., Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН (Россия, Республика Карелия, 185030 г. Петрозаводск, пр. Александра Невского, 50), ryzhakov@nwpi.krc.karelia.ru*

Ключевые слова: Онежское озеро, Петрозаводская губа, железо, аллохтонное вещество, седиментация, моделирование, рандомизация

Получена: 01 июня 2020 года
Подписана к печати: 26 июня 2020 года

Аннотация. Изменения климата на территории Карелии привели к росту поступления аллохтонного вещества в водоемы. На протяжении тридцати лет растет вынос с водами реки Шуя растворенных и взвешенных гумусовых веществ, а также железа и фосфора в их составе в Петрозаводскую губу Онежского озера. Процессы браунификации привели к снижению качества воды и негативно отразились на состоянии бентосных сообществ. Для оценки объемов поступления, выноса и оседания аллохтонных веществ, поступивших в Онежское озеро с водами р. Шуя, было применено имитационное моделирование. Построены варианты модели, включающие данные по трем веществам (железо, фосфор, взвешенные вещества) и круглогодичный цикл водной динамики. Параметрами модели служили коэффициенты переноса и «исчезновения» (оседания) веществ из вод Петрозаводской губы. Настройка параметров выполнялась на основе натурных данных по химическому составу речных и озерных вод за 1992–2018 гг. Модель рассчитывает концентрации веществ, сопоставимые с реальными данными, а также дает возможность оценить массу осевшего железа, основного фактора угнетения глубоководного зообентоса в Онежском озере. В течение года из поступившего в Петрозаводскую губу железа выносится за пределы губы около 40 %, около 30 % оседает на дно и 30 % постоянно присутствует в воде. Распределение веществ в губе в течение года существенно меняется. В течение зимы и весны происходит постепенное возрастание концентраций аллохтонных веществ в заливе. После завершения весеннего перемешивания воды Петрозаводской губы быстро заменяются водами центрального плеса и концентрации веществ в заливе и прилегающем районе озера выравниваются.

© Петрозаводский государственный университет

Введение

Региональной особенностью химического состава воды озер Карелии является большое количество гумусовых веществ, привносимых с заболоченного водосбора с речным стоком. В комплексе с гумусовым веществом в водоемы поступает железо и органический фосфор (Лозовик, 2013; Лозовик и др., 2013). Эти особенности определяют невысокое качество вод многих озер региона, региональное медианное значение цветности воды составляет 66 град., медианное значение концентрации общего железа – 0.43 мг/л (Лозовик, 2006). Аллохтонное вещество играет большую роль в функционировании водных экосистем Карелии, определяя их биоразнообразие, гетеротрофный тип метаболизма и низкую биопродуктивность, слабую устойчивость к закислению и эвтрофированию (Теканова и др., 2018).

Онежское озеро имеет большую водосборную территорию, более 52 тыс. км^2, и 52 притока длиной более 10 км (Онежское озеро..., 2010). Терригенный сток аллохтонного вещества имеет очень важное значение для функционирования экосистемы озера, определяя ее гетеротрофный метаболизм (Kalinkina et al., 2017).

В настоящее время показано, что региональные изменения климата (увеличение среднегодовой температуры на 1 °C – Филатов и др., 2013) привели к тому, что в Петрозаводской губе Онежского озера увеличилась цветность воды, концентрации железа, фосфора, взвешенного вещества, углекислого газа за последние 25–30 лет (Калинкина и др., 2019). Эти изменения стали результатом роста речного стока аллохтонных веществ в Петрозаводскую губу (Калинкина и др., 2018). Увеличение концентрации железа в воде привело к его накоплению на дне и угнетению

жизнедеятельности донных беспозвоночных, что проявилось в существенном сокращении их количества в этот же период (Калинкина и др., 2016). Тенденции к изменению химического состава воды, связанные с увеличением поступления в озеро аллохтонных веществ, выявлены и в открытом плесе Онежского озера (Kalinkina et al., 2020).

Происходящие в экосистеме Онежского озера изменения требуют количественной оценки распределения привносимых в водоем аллохтонных веществ. Подходы к решению этого вопроса разрабатываются на примере достаточно хорошо изученной Петрозаводской губы. Ранее построенная модель (Коросов и др., 2019) включала данные по поступлению с речными водами и распределению в Петрозаводской губе только одного вещества – общего железа. Для увеличения репрезентативности модели необходимо выполнить оценку распределения и других компонентов аллохтонного вещества, например, фосфора и взвешенных веществ, которые также проявляют тенденцию к возрастанию (Калинкина и др., 2019).

Цель настоящих исследований – на основании имитационной модели, оперирующей данными для ряда химических компонентов вод Петрозаводской губы, описать закономерности пространственного и временного перераспределения железа, фосфора и взвешенных веществ на протяжении последних 27 лет.

Материалы

Петрозаводская губа – северо-западный залив Онежского озера. Ее площадь составляет 76 км^2, средняя глубина 16 м, максимальная глубина 29 м, объем воды 1.17 км^3, период условного водообмена 0.35 года. В Петрозаводскую губу впадает р. Шуя, второй по величине приток Онежского озера (Онежское озеро…, 2010). Ежегодно губа принимает около 3 км^3 шуйских вод и около 50 тыс. тонн аллохтонного органического вещества (Сабылина, 2016). Весной после разрушения ледового покрова в первой декаде мая и до первой декады июня воды Петрозаводской губы полностью или частично изолированы от вод открытого плеса весенним термическим баром, что существенно снижает водообмен между этими частями озера. Осенью формируется сходная, но менее ярко выраженная гидродинамическая ситуация по мере прохождения осеннего термобара (Петров, 1990).

Для построения моделей использованы данные по содержанию общего железа, общего фосфора и взвешенных веществ в разных районах Петрозаводской губы за 1992–2018 гг. Измерения концентраций этих веществ проводились в аккредитованной лаборатории гидрохимии и гидрогеологии Института водных проблем Севера Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр РАН» (Аналитические…, 2017). Для каждого вещества известна его концентрация в отдельные месяцы разных лет в период с 1992 по 2018 г. (всего 27 лет исследований). Для р. Шуя известны объемы сброса за каждый месяц каждого года. Для 3 камер Петрозаводской губы за 27 лет по 12 месяцев база данных могла бы содержать 3 * 12 * 27 = 972 значения, фактически же имеются лишь 312 значений, т. е. база заполнена примерно на 30 %. Эмпирические значения довольно широко варьируют в течение сезона и в разных камерах. По этой причине для каждой из трех камер они были усреднены для трех сезонов «зима» (ноябрь – май), «весна» (июнь), «лето» (июль – сентябрь) и фигурируют как значения для трех месяцев – февраль, июнь, август. Таким образом, общий размер таблицы с эмпирическими данными составил 3 камеры * 3 месяца * 27 лет = 243 поля, из которых часть (243–184 = 59) все же осталась незаполненной.

Методы

Подробное описание общей схемы использованной камерной модели приведено в публикациях (Коросов и др., 2019, 2020). Нынешний вариант существенно расширен за счет добавления двух новых веществ и попытки учета смены режима водообмена с зимнего на летний. В модели отражены процессы переноса веществ в каждый месяц

для всех 27 лет, т. е. общее число шагов модели составляет 25 * 13 = 325. В модели описаны пять камер. Отдельная камера характеризует сток р. Шуя объемом 3 куб. км/год. Петрозаводская губа представлена тремя камерами (1 – вершина, 2 – средняя часть, 3 – горло) каждая объемом около 0.4 куб. км, еще одна камера (4) – приемник веществ или открытое Онежское озеро, объем не задан. Модель оперирует значениями общего содержания веществ в воде камеры; рассчитываются значения содержания изучаемых веществ в камерах. Для трех камер Петрозаводской губы рассчитывается 972 значения (3 камеры * 12 месяцев * 27 лет). Для настройки модели расчетные данные сравнивались с эмпирическими (для тех месяцев, когда имелись наблюдения), рассчитывалась обобщенная разность, функция невязки, которая минимизировалась с помощью процедуры оптимизации (функция nlm() среды программы R).

Структура модели соответствует процессам поступления речных вод в Петрозаводскую губу, их распространения в заливе от вершины к горлу, смешивания с водами центрального плеса Онежского озера. В модели для каждой камеры за каждый месяц рассчитывались следующие показатели баланса по массе каждого вещества: поступление, исчезновение (оседание) и сток (перенос вещества в следующую камеру).

$M_i = (M_{it} + P_{i-1}) - S_i - P_{i+1},$

где M_i – масса вещества в i-й камере, P_{i-1} – приток, S_i – оседание, P_{i+1} – сток, M_{it} – начальное содержание в год t.

Количество поступившего вещества задает коэффициент переноса вещества из предыдущей камеры. Величина поступления в первую камеру принималась как эмпирическое значения стока р. Шуя. Перенос во вторую и третью камеры равен произведению коэффициента переноса на содержание вещества в предыдущей камере ($M_i = p^1 * Mi\text{-}1$). Рассчитанное таким образом количество вещества вычитается из содержания в текущей камере и прибавляется к содержанию в следующей. Объем исчезновения (оседания) задает коэффициент оседания, который принимался одинаковым для всех камер ($S_i = p^2 * Mi$). После прибавления массы принесенного вещества и вычитания массы вынесенного и осевшего вещества определенная ее часть остается в камере (M_{it}). Коэффициенты переноса (p^1) и оседания (p^2) априорно неизвестны (они могут принимать значения от 0 до 1), и их значения определяются в процессе настройки модели.

Условия переноса веществ и разбавления речных вод водой открытого плеса озера в течение года существенно меняются. В холодный период, когда озеро покрыто льдом, а также в период прохождения весеннего (середина мая – середина июня) и осеннего (октябрь – ноябрь) термобара водообмен замедлен и речные воды постепенно наполняют Петрозаводскую губу, в результате этого концентрации всех веществ постоянно возрастают. После исчезновения весеннего термобара начинается активное взаимодействие вод Петрозаводской губы и открытого плеса (июнь), концентрации веществ в воде губы быстро снижаются и поддерживаются на относительно низком уровне в течение летней межени (июль – сентябрь). Таким образом, в соответствии с режимом водообмена в Петрозаводской губе можно выделить как минимум два гидрохимических режима – зимнее накопление веществ и летнее разбавление веществ, или даже три – зимнее накопление, быстрое раннелетнее и медленное летнее разбавление. Исходя из этих соображений, были рассчитаны два варианта модели – с одной и двумя сменами режима перераспределения веществ в губе.

В каждом варианте модели участвовало по три вещества – железо, фосфор, взвешенные вещества. При этом коэффициенты переноса в каждом сезоне были приняты одинаковыми для всех веществ (все вещества переносились одними и теми же массами воды), но коэффициенты оседания – разными, поскольку вещества обладают разными физико-химическими свойствами. Таким образом, в первом варианте модели настраивались пять коэффициентов – один коэффициент зимнего переноса, один коэффициент летнего переноса, три коэффициента оседания для трех веществ. Во втором варианте настраивалось шесть коэффициентов – три

коэффициента переноса (зимнего, весеннего и летнего) и три коэффициента оседания.

Устойчивость модели оценивалась с помощью процедуры рандомизации (Шитиков, Розенберг, 2013). Процесс состоит в том, чтобы при настройке модели использовать не весь объем исходных данных, но только части (50–70 %), которые отбираются из полной базы случайным образом. Многократно вычисляемые таким образом коэффициенты переноса и оседания будут случайным образом варьировать, давая возможность сымитировать статистическое распределение параметров и найти их дисперсии, т. е. выйти на оценку доверительных интервалов и состоятельности модели.

Моделирование и статистический анализ данных выполнен в среде пакета R.

Результаты

Выявление трендов

Наблюдения показывают, что в водах Петрозаводской губы в зимние месяцы происходит накопление изучаемых веществ, летом концентрации снижаются на 14–53 % (табл. 1).

Таблица 1. Средние значения концентрации веществ в водах Петрозаводской губы в зимний и летний периоды

Вещество	Зимой	Летом	% отличий
Общее железо, мг/л	0.375	0.176	53
Общий фосфор, мкг/л	21.9	18.8	14
Взвешенное вещество, мг/л	2.2	1.69	23

Рассматривая разные камеры, можно видеть постепенное снижение концентраций в направлении от р. Шуя к открытому озеру. По сравнению с водами р. Шуя в открытом плесе Онежского озера летом концентрации ниже в 5–7 раз, зимой – в 4–5 раз (табл. 2, 3).

Таблица 2. Средние значения концентрации веществ в летний период

Вещество	Шуя	Камера 1	Камера 2	Камера 3	Открытое озеро
Общее железо, мг/л	0.72	0.35	0.11	0.11	0.11
Общий фосфор, мкг/л	34.64	25.94	15.86	15.54	16.99
Взвешенное вещество, мг/л	6.05	3.11	1.31	0.93	1.08

Таблица 3. Средние значения концентрации веществ в зимний период

Вещество	Шуя	Камера 1	Камера 2	Камера 3	Открытое озеро
Общее железо, мг/л	0.88	0.6	0.37	0.27	0.23
Общий фосфор, мкг/л	34.73	26.79	20.13	20.33	20.55
Взвешенное вещество, мг/л	7.37	2.64	1.63	1.61	1.52

Выявить общие значимые тенденции в изменении концентрации химических веществ позволяет метод дисперсионного анализа, который требует нормальности в распределении остатков. К сожалению, концентрации химических веществ не имеют

нормального распределения, вследствие чего необходимо применять либо непараметрические методы, либо методы, слабо зависящие от типа распределения. Одним из таких методов является GLM-регрессия. Исследование концентраций веществ в водах р. Шуи показало, что концентрации практически всех веществ меняются по сезонам (табл. 4). Содержание железа значимо меняется и по месяцам. Для двух веществ (железо, фосфор) значимым является и многолетний тренд: начиная с 1992 г. их концентрации увеличиваются. Для взвешенных веществ многолетний тренд слаб и незначим.

Таблица 4. Уровень значимости эффекта влияния трех факторов на концентрации веществ, оцененный с помощью GLM-анализа для вод р. Шуя

Фактор	Fe	P	Взвесь
Свободный член	<0.01	0.052	0.16
Год	<0.01	0.03	0.07
Месяц	<0.01	0.07	0.38
Сезон	<0.01	<0.01	0.11

Анализ концентраций веществ в водах Петрозаводской губы показывает сходную картину. Хорошо и значимо выражена сезонная динамика, выявлены значимые отличия между камерами, однако многолетний тренд изменения концентраций практически у всех веществ оказывается незначимым (табл. 5). При сопоставлении представленных таблиц общим является одинаковая динамика двух веществ – железа и фосфора, варьируют результаты по взвеси. При сравнении табл. 4 и 5 становится очевидным, что при выраженном многолетнем тренде изменений концентраций железа и фосфора в водах р. Шуя такой же значимый тренд для этих веществ в Петрозаводской губе отсутствует.

Таблица 5. Уровень значимости эффекта влияния трех факторов на концентрации трех веществ в Петрозаводской губе, оцененный с помощью GLM-анализа

Фактор	Fe	P	Взвесь
Свободный член	0.41	0.87	0.60
Год	0.32	0.62	0.58
Месяц (Сезон)	<0.01	<0.01	<0.01
Камера	<0.01	<0.01	0.28

Причина противоречия заключается в том, что воды Петрозаводской губы многократно разбавляются водами открытого плеса, что сглаживает отличия по концентрациям. Необходимо также учитывать, что в разных частях акватории (в отдельных камерах) Петрозаводской губы многолетние тренды для разных сезонов все же выражены значимо (табл. 6, рис. 1). При этом даже незначимые тренды показывают увеличение концентраций изученных веществ. Причина неустойчивости этого однонаправленного результата кроется прежде всего в недостаточном объеме выборки. Выполняя необходимое деление данных на подмножества в результирующем анализе, мы оперируем выборками в 10–20 вариант, от которых трудно ожидать значимых различий. Тем не менее можно заключить, что намечается общая тенденция – рост концентраций изучаемых веществ в Петрозаводской губе.

Таблица 6. Уровень значимости коэффициентов *b* линейной регрессии (*a* + *b* * год) для многолетних трендов концентрации разных веществ в трех камерах Петрозаводской губы в зимний и летний периоды

Сезон	Камеры	Fe	P	Взвесь
Зима	1	0.2	0.3	0.1
	2	0.9	0.3	<0.01
	3	<0.01	0.03	0.01
Лето	1	0.3	0.3	0.7
	2	0.1	0.05	0.8
	3	0.7	0.7	0.4

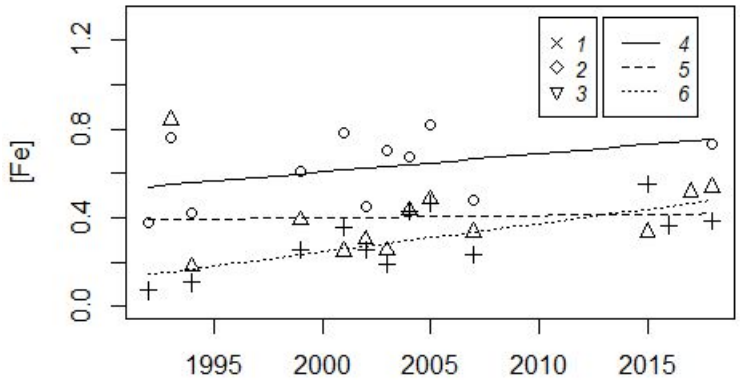


Рис. 1. Многолетние линейные тренды изменения концентраций железа в Петрозаводской губе (1–3 – эмпирические данные для камер, 4–6 – тренды для камер)
Fig. 1. Long-term linear trends of iron concentrations changes in the Petrozavodsk Bay (1–3 – empirical data for chambers, 4–6 – trends for chambers)

Средние арифметические плохо характеризуют тренды для асимметричных распределений, они лучше проявляются при сравнении полных выборок. Плотности распределения концентраций общего железа в разных камерах представлены на рис. 2, концентраций общего фосфора – на рис. 3.

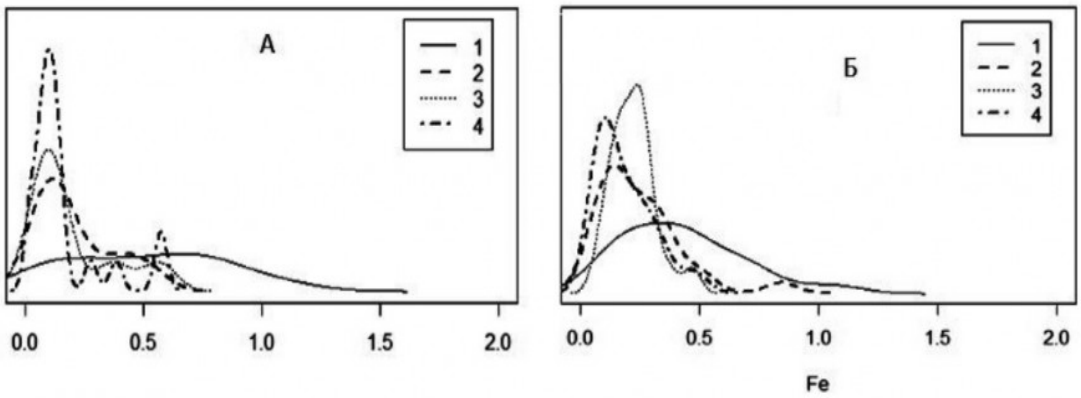


Рис. 2. Распределение концентраций общего железа в четырех камерах. А – 1992–2000 гг.; Б – 2001–2018 гг.;
1–4 – номер камеры
Fig. 2. Distribution of total iron concentrations in four chambers. A – 1992–2000; B –

2001–2018; 1–4 – number of chamber

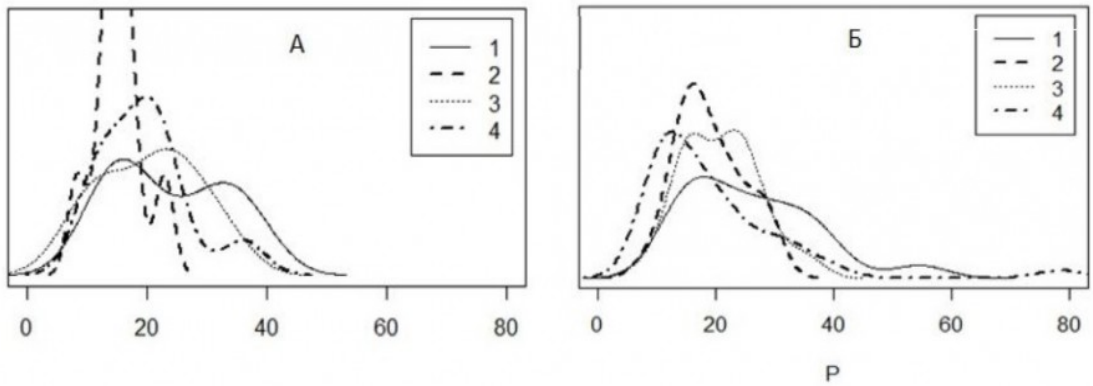


Рис. 3. Распределение концентраций общего фосфора в четырех камерах. А – 1992–2000 гг.; Б – 2001–2018 гг.;
1–4 – номер камеры
Fig. 3. Distribution of total phosphorous concentrations in four chambers. A – 1992–2000; B – 2001–2018; 1–4 – number of chamber

Сравнение данных для двух периодов (1992–2000 и 2001–2018 гг.) выявляет следующие общие тенденции для всех камер. Во-первых, все полигоны становятся шире за счет смещения вправо правой границы, т. е. возрастает доля высоких концентраций. Во-вторых, центры распределений (соответствующие средним) также смещены вправо. За счет роста числа проб с высокими концентрациями веществ в последние два десятилетия увеличивается и дисперсия, и средние значения концентраций веществ в камерах.

Резюмируя анализ эмпирических данных, можно утверждать следующее. Вещества в Петрозаводской губе распределены неравномерно как по акватории, так и по сезонам и годам. Воды горловой части (камера 3) по концентрациям изучаемых веществ очень близки к водам открытого озера во все сезоны, средняя часть губы (камера 2) только в зимний период характеризуется повышенными концентрациями веществ, в вершинной части (камера 1) и зимой, и летом содержится в 2–3 раза больше веществ по сравнению с прочими камерами. Зимой концентрации веществ в Петрозаводской губе в 2 раза выше, чем летом, и это различие с годами возрастает.

Моделирование динамики веществ по отдельности

Смысл моделирования распространения веществ в водах Петрозаводской губы состоит в том, чтобы детальнее понять механизмы этого процесса, а также подойти к расчету количества осевшего вещества на дно Петрозаводской губы.

В процессе настройки модели в автоматическом режиме (с использованием функции nlm) подбирались такие значения констант переноса, при которых расчетные значения концентраций вещества становились как можно более близкими к

эмпирическим значениям. Имеющиеся данные позволяют связать воедино потоки веществ и представить пути их перераспределения в компактном виде констант переноса и оседания.

Сначала все константы были рассчитаны для каждого вещества по отдельности (табл. 7). В зимний период коэффициенты переноса у всех веществ близки к 0.35. Иными словами, в зимний период в течение каждого месяца примерно треть массы каждого вещества переносится из предыдущей камеры в следующую. Это хорошо соответствует представлению о ламинарности зимнего процесса переноса воды, связанного с пополнением вод Петрозаводской губы только водами р. Шуя в отсутствие ветрового перемешивания вод губы и открытого плеса озера.

Константы переноса в летний период варьируют существенно сильнее. Для железа и фосфора они становятся в 2–4 раза меньше, для взвеси – почти нулевые.

Таблица 7. Параметры модели, рассчитанные для каждого вещества отдельно

Вещество	Коэффициент переноса зимой	Коэффициент переноса летом	Коэффициент оседания
Общее железо	0.312	0.158	0.163
Общий фосфор	0.344	0.055	0.039
Взвешенное вещество	0.393	-0.001	0.085

Убрать отмеченную неопределенность можно, если в одной модели объединить описание процессов переноса сразу трех веществ, т. е. снизить параметричность модели, приняв коэффициенты переноса для них общими. Кроме этого, объединение данных по трем веществам неизбежно повысит их репрезентативность.

Модель с одновременным учетом динамики нескольких веществ

В этих вариантах модели для расчета модельных концентраций трех веществ используются один коэффициент зимнего, один коэффициент летнего переноса и еще три индивидуальных коэффициента оседания вещества (табл. 8). Результаты моделирования переноса нескольких веществ в целом отличаются от индивидуальной настройки для каждого вещества (представленных в табл. 9). Хотя константы зимнего переноса оказались примерно такие же и составляют 0.33, константы летнего переноса усреднились и примерно совпали с константами переноса для железа – 0.1. Константы оседания практически обнулились и только для железа сохранили свое значение – около 15 %.

Таблица 8. Параметры модели, рассчитанные для всех веществ совместно

Вещество	Коэффициент переноса зимой	Коэффициент переноса летом	Коэффициент оседания
Общее железо	0.327	0.094	0.153
Общий фосфор	0.327	0.094	0.039
Взвешенные вещества	0.327	0.094	0.094

При этом расчетные модельные значения концентраций в целом соответствовали выявленным выше трендам (рис. 4), но явно отклонялись от эмпирических средних: были занижены для зимы и завышены для лета. По-видимому, не был учтен какой-то важный фактор, мешающий модельной линии более точнее аппроксимировать результаты наблюдений.

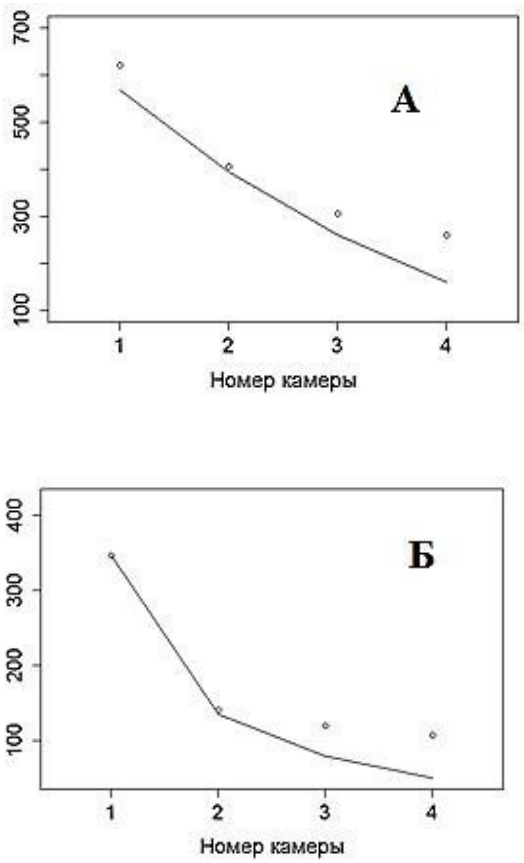


Рис. 4. Средние за все годы оценки содержания железа в водах Петрозаводской губы в зимний (А) и летний (Б) периоды (константы – 0.327, 0.094, 0.153); по оси абсцисс – номера камер (1–3 – камеры, 4 – прилегающий район озера); по оси ординат – содержание в камерах железа (тонн/год)

Figure 4. Average volumes of iron content in the waters of the Petrozavodsk Bay for all years in winter (A) and summer (B) (constants – 0.327, 0.094, 0.153); abscissa axis – chamber numbers (1–3 – chambers, 4 – adjacent lake area); ordinate axis – iron content in the chambers (tons/year)

В целом коэффициенты переноса показывают следующее: в среднем зимой вынос веществ активный (p = 0.3), летом – менее активный (p = 0.1).

Однако эти результаты прямо противоречат фактам о том, что летом происходит двукратное падение концентраций веществ, т. е. в течение летнего периода вещества выносятся из Петрозаводской губы за счет разбавления чистыми онежскими водами, что и снижает их концентрации. Об этом же говорят расчеты и по одной из наших предыдущих моделей (Коросов и др., 2019): в летний период воды р. Шуя должны быть 2–3–кратно разбавлены водами открытого плеса озера. Иными словами, летом коэффициент выноса должен быть выше, чем зимой, а для трех веществ наблюдается обратная картина. Необходимо так изменить структуру модели, чтобы учесть феномен быстрого падения концентраций.

Модели, учитывающие раннелетнее перемешивание вод

Как было отмечено, в Петрозаводской губе после прохождения термобара в июне начинается интенсивный водообмен между Петрозаводской губой и открытым плесом Онежского озера. Учесть это явление в модели можно, если обеспечить месяц июнь отдельным параметром переноса (водообмена). Всего в модели для отдельного вещества параметров становится четыре, в модели для трех веществ – шесть. Выполненные расчеты для каждого вещества в отдельности показывают, что в целом

предложенный сценарий больше соответствует реальности. Коэффициент переноса в июне оказался очень большим, в 2–3 раза превышающим константу зимнего переноса, которая почти не изменилась (0.36) (табл. 9). Таким образом, модель реализовала явление резкого падения концентраций веществ в водах Петрозаводской губы ранним летом. При этом константа летнего переноса либо обнулилась, либо стала отрицательной (обратный занос веществ в Петрозаводскую губу). Это отражает становление единой водной массы и в Петрозаводской губе, и в центральном плесе Онежского озера в результате активного водообмена и уменьшения выноса этих веществ с водами р. Шуя в летний период. В отдельных частях акватории градиенты изменения концентраций могут случайно быть самыми разнонаправленными, что и учитывают коэффициенты с разными знаками. Теперь становится понятной невысокая величина летнего переноса, которая обрела смысл коэффициента, усредняющего перенос для всех летних месяцев. Следствием случайного варьирования в целом невысоких концентраций веществ в воде Онежского озера оказывается рассогласование значений констант переноса разных веществ для раннелетнего (от 0 до 0.7) и летнего (от -0.3 до 0.5) периодов. В этом варианте с четырьмя параметрами функция невязки снижалась, но незначительно – самое большее на 30 % по сравнению с вариантом с тремя параметрами. Вместе с этим утратился смысл двух обнулившихся параметров модели – переноса веществ летом и оседания.

Таблица 9. Константы переноса веществ в разные сезонные периоды, рассчитанные в модели для каждого вещества отдельно

Вещество	Константа переноса в ноябре – мае (зима)	Константа переноса в июне	Константа переноса в июле – сентябре	Константа оседания
Общее железо	0.360	0.655	-0.307	0.074
Общий фосфор	0.364	0.437	-0.292	0.035
Взвешенное вещество	0.368	0.044	0.512	-0.201

В поисках причин, влияющих на коэффициенты летнего переноса, в конструкцию модели внесли следующие изменения. Выполнили серию настроек модели, при которой функцию невязки вычисляли, во-первых, только по зимним данным, во-вторых, только по летним данным, как с включением отдельной константы для июня, так и с константой, общей для всего летнего периода (табл. 10).

Таблица 10. Параметры переноса железа, рассчитанные для вариантов модели с измененной структурой

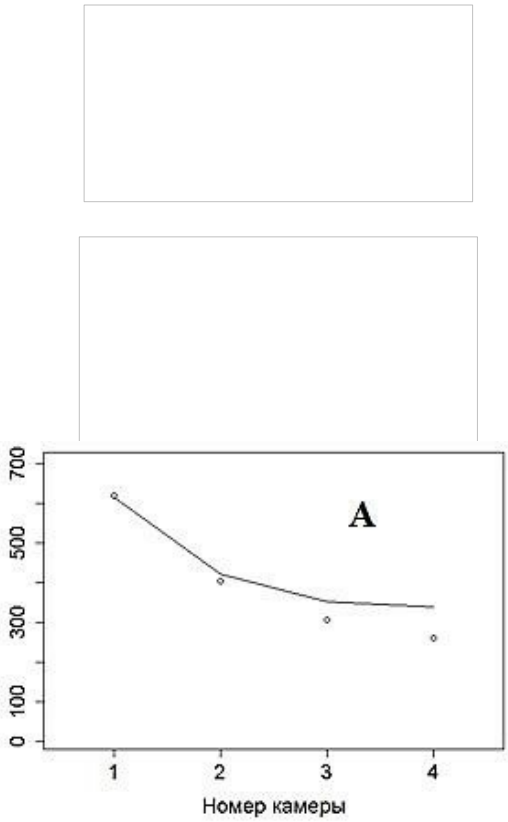
Модель	Учет сезонов в функции невязки	Константа переноса зимой	Константа переноса летом	Константа переноса в июне	Константа оседания
Модель со среднелетним параметром переноса	лето и зима	0.312	0.158	–	0.163
	только зима	0.345	0.040	–	0.066
	только лето	0.95	0.10	–	-0.342

Модель с двумя параметрами летнего переноса	лето и зима	0.360	-0.307	0.655	0.074
	только зима	0.390	-0.296	0.708	0.038
	только лето	0.214	0.218	0.259	0.509

Независимо от изменения структуры модели и способа расчета функции невязки, константы зимнего переноса остаются на одном уровне 0.31–0.34. Это мы рассматриваем как существенный показатель устойчивости модели, ее хорошего соответствия эмпирическим данным, собранным в зимний и весенний периоды. Однако стоит только исключить из рассмотрения зимние данные, как конструкция распадается и коэффициенты переноса (зимой) принимают неправдоподобные значения – от 0.95 до 0.2. В моделях, настроенных только по летним данным, очень сильно варьируют константы летнего переноса (0.1–0.3), и особенно неприемлемо (бессмысленно) – константы оседания на дно (-0.3–0.5).

Обсуждение

Какая же модель более правильная, точнее учитывает динамику химических веществ в воде – с учетом одной или двух констант летнего переноса? Что лучше – небольшое улучшение качества описания или устойчивость параметров? Сопоставление модельных значений с реальными (рис. 5) показывает, что, несмотря на изменение структуры, вторая модель по-прежнему весьма приблизительно описывает реальность – в целом ход модели соответствует некоему среднему ожидаемому уровню, а изменение структуры не ведет к кардинальному улучшению качества аппроксимации.



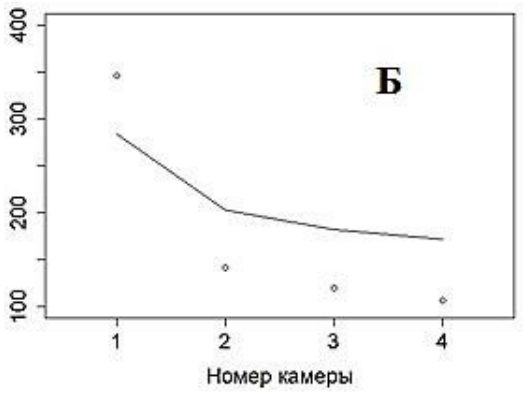


Рис. 5. Средние за все годы оценки содержания железа в водах Петрозаводской губы в зимний (А) и летний (Б) периоды (константы: 0.378, 0.440, -0.011, 0.142); по оси абсцисс – номера камер (1–3 – камеры, 4 – прилегающий район озера); по оси ординат – содержание в камерах железа (тонн/год)

Figure 5. Average volumes of iron content in the waters of the Petrozavodsk Bay for all years in winter (A) and summer (B) (constants: 0.378, 0.440, -0.011, 0.142); abscissa axis – chamber numbers (1–3 – chambers, 4 – adjacent lake area); ordinate axis – iron content in the chambers (tons/year)

Во-первых, необходимо обратить внимание на то, что в отдельный год модель рассчитывает 48 оценок массы (4 камеры, 12 месяцев), а размеры эмпирических выборок для одного года в лучшем случае составляют 6–8 проб. Естественно, возникают случайные смещения. Значит, судить о качестве модельного описания в отдельный год или за короткий ряд лет практически невозможно, для этого не хватает репрезентативности данных. Во-вторых, видно, что, расходясь в деталях, уровень прогнозных значений в общем совпадает с уровнем эмпирических значений. Следовательно, второй модели нельзя отдать предпочтение. Третья причина, по которой нужно выбрать вариант без июньских констант переноса, состоит в том, что константы зимнего переноса гораздо более устойчивы, чем константы летнего переноса отдельно или совместно с июньским. Если обе модели примерно одинаково воспроизводят главный процесс (зимнее перераспределение веществ), то, следуя принципу Оккама, отдать предпочтение следует более простой и понятной модели.

Итак, варьирование структурой модели показало, что устойчиво воспроизводятся только данные зимнего переноса, только его параметры остаются примерно одинаковыми в разных модельных вариантах. Это видно и на моделях отдельных веществ, и при включении в модель нескольких веществ: сходное перераспределение в зимний период при отсутствии перемешивания водной массы ветрами и течениями. Напротив, процессы перемешивания вод в летний период находят в моделях очень неустойчивое отображение, видимо, из-за широкого варьирования концентраций как следствие многообразия процессов, участвующих в переносе веществ в разные периоды теплого сезона.

Таким образом, построенная модель с тремя параметрами может успешно восстановить градиент концентраций веществ в водах Петрозаводской губы только для зимнего периода.

Для оценки пределов варьирования прогнозных значений концентрации общего железа использовали методику ресамплинга. Распределения трех параметров оказались унимодальными и симметричными с медианами 0.327, 0.193, 0.177 и стандартными отклонениями 0.024, 0.062, 0.012 (рис. 6).

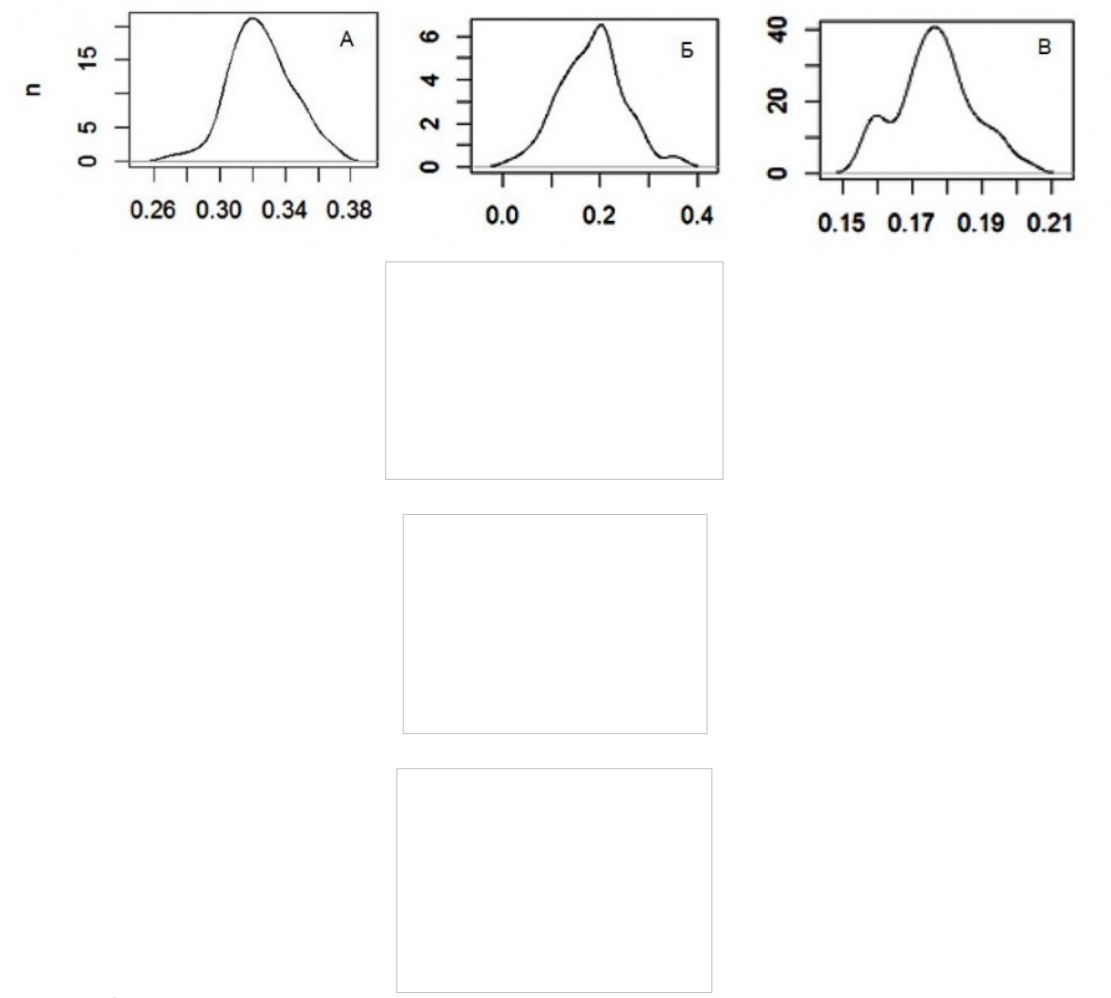


Рис. 6. Распределение положительных модельных коэффициентов переноса зимой (А), летом (Б) и оседания (В) для числа итераций n = 100

Fig. 6. Distribution of positive model transfer coefficients in winter (A), summer (Б) and distribution of sedimentation coefficients (B) for the number of iterations n = 100

Заключение

Статистический анализ и моделирование распространения трех веществ в Петрозаводской губе Онежского озера позволяет утверждать следующее. Вещества в Петрозаводской губе распределены в убывающей геометрической прогрессии от места впадения р. Шуя (вершина, камера 1) до горловой части (камера 3). Концентрация веществ в камере 3 очень близка к их содержанию в открытом плесе озера во все сезоны. Средняя часть (камера 2) только в зимний период характеризуется повышенными концентрациями веществ. В вершинной части (камера 1) содержание веществ и зимой, и летом в 2–3 раза больше по сравнению с прочими камерами. Зимой концентрации веществ в Петрозаводской губе в 2 раза выше, чем летом, и это различие с годами возрастает.

С помощью моделирования удалось установить следующие детали этого процесса. В течение зимнего периода происходит равномерное заполнение Петрозаводской губы водами р. Шуя со скоростью 0.33/мес. и плавный рост концентраций аллохтонных веществ. После исчезновения термобара усиливается водообмен между Петрозаводской губой и открытым плесом Онежского озера, что приводит к перераспределению вынесенных веществ по акватории. Небольшой объем данных и широкое варьирование значений концентрации изученных веществ не позволяют однозначно описать этот процесс принятой детерминистической камерной моделью.

В качестве базовой модели для расчетов количественных характеристик стока и

оседания отдельного вещества следует использовать модель с тремя параметрами – среднезимний перенос, среднелетний перенос, среднегодовое оседание. В этом случае модель устойчиво рассчитывает градиент оценок концентраций для зимнего периода и усредненный – для летнего.

Библиография

Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / Под ред. П. А. Лозовика, Н. А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.

Калинкина Н. М., Филатов Н. Н., Теканова Е. В., Балаганский А. Ф. Многолетняя динамика стока железа и фосфора в Онежское озеро с водами р. Шуя в условиях климатических изменений // Региональная экология. 2018. № 2 (52). С. 65–73. DOI: 10.30694/1026-5600-2018-2-65-73.

Калинкина Н. М., Сидорова А. И., Полякова Т. Н., Белкина Н. А., Березина Н. А., Литвинова И. А. Снижение численности глубоководного макрозообентоса Онежского озера в условиях многофакторного воздействия // Принципы экологии. 2016. Т. 5. № 2. С. 47–68. DOI: 10.15393/j1.art.2016.5182.

Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сабылина А. В., Рыжаков А. В. Изменения гидрохимического режима Онежского озера с начала 1990-х годов // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2019. № 1. С. 62–72. DOI: 10.31857/S2587-55662019162-72.

Коросов А. В., Калинкина Н. К., Теканова Е. В., Исакова К. В. Изучение условий жизни гидробионтов в водоемах Карелии с помощью камерной модели // Теоретические проблемы экологии и эволюции. Качество воды и водные биоресурсы (VII Любищевские чтения) / Под ред. чл.-корр. РАН Г. С. Розенберга, проф. С. В. Саксонова. Тольятти: Анна, 2020. С. 27–32. URL: http://www.ievbras.ru/download/lubischev_2020.pdf (дата обращения 12.04.2020).

Коросов А. В., Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Рыжаков А. В. Закономерности распределения поступившего с речным стоком железа в Петрозаводской губе Онежского озера // Региональная экология. 2019. № 1 (55). С. 13–24. DOI: 10.30694.1026-5600-2019-1-13-24.

Лозовик П. А. Геохимическая классификация поверхностных вод гумидной зоны на основе их кислотно-основного равновесия // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 6. С. 583–592. DOI: 10.7868/S0321059613060072.

Лозовик П. А. Гидрохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию : Автореф. дис. ... д-ра хим. наук. М.: Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН, 2006. 60 с.

Лозовик П. А., Сабылина А. В., Рыжаков А. В. Химический состав озерных вод // Озера Карелии: Справочник. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2013. С. 30–36.

Онежское озеро: Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. 151 с. URL: http://elibrary.krc.karelia.ru/432/ (дата обращения 12.04.2020).

Петров М. П. Термический режим // Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения / Ред. З. С. Кауфман. Л.: Карельский научный центр АН СССР, 1990. С. 32–37. URL: https://www.booksite.ru/fulltext/natural/onezhskoje/text.pdf (дата обращения 12.04.2020).

Сабылина А. В. Поступление в Онежское озеро органического углерода, общего фосфора и общего азота с речным стоком и вынос с водами р. Свири в 1965–2008 годах // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 9. С. 68–77. DOI: 10.17076/lim307.

Теканова Е. В., Калинкина Н. М., Кравченко И. Ю. Геохимические особенности функционирования биоты в водоемах Карелии // Известия РАН. Серия географическая. 2018. № 1. С. 90–100. DOI: 10.7868/S2587556618010083.

Филатов Н. Н., Руховец Л. А., Назарова Л. Е., Баклагин В. Н., Георгиев А. П.,

Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Толстиков А. В., Шаров А. Н. Влияние изменений климата на экосистемы озер // Вестник РФФИ. 2013. № 2 (78). С. 43–50.

Шитиков В. К., Розенберг Г. С. Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R . Тольятти: Кассандра, 2013. 314 с. URL: http://www. ievbras.ru/download/Random.pdf (дата обращения 12.04.2020).

Kalinkina N., Tekanova E., Korosov A., Zobkov M., Ryzhakov A. What is the extent of water brownification in Lake Onego, Russia? // Great Lakes Research J. 2020. URL: https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.02.008 (дата обращения 28.02.2020).

Kalinkina N. M., Nazarova L. E., Tekanova E. V., Litinsky P. Yu., Sidorova A. I. The assessment of change and Watershed Effect on the heterotrophic metabolism in the lake Onego ecosystem // Environment. Technology. Recourses: Proceeding of the 11th International Scientific and Practical Conference. Vol. I. Rezekne, Latvia, 2017. P. 140–144. URL: http://journals.ru.lv/index.php/ETR/article/view/2634/2510 (дата обращения 28.02.2020).

THE MODEL OF SUBSTANCES REDISTRIBUTION IN THE WATERS OF PETROZAVODSK BAY OF ONEGA LAKE

TEKANOVA Elena Valentinovna	*PhD, Northern Water Problems Institute Karelian Research Center RAS (185030 Russia, Petrozavodsk, A. Nevsky ave., 50), etekanova@mail.ru*
KOROSOV Andrei Viktorovich	*D.Sc., Northern Water Problems Institute Karelian Research Center RAS (185030 Russia, Petrozavodsk, A. Nevsky ave., 50), avkorosov@gmail.com*
KALINKINA Natalia Mikhailovna	*D.Sc., Northern Water Problems Institute Karelian Research Center RAS (185030 Russia, Petrozavodsk, A. Nevsky ave., 50), cerioda@mail.ru*
ISAKOVA Ksenia Valeryevna	*postgraduate student, Northern Water Problems Institute Karelian Research Center RAS (185030 Russia, Petrozavodsk, A. Nevsky ave., 50), ksusha_isakova@mail.ru*
RYZHAKOV Aleksandr Vadimovich	*PhD, Northern Water Problems Institute Karelian Research Center RAS (185030 Russia, Petrozavodsk, A. Nevsky ave., 50), ryzhakov@nwpi.krc.karelia.ru*

Keywords: Lake Onega, Petrozavodsk Bay, iron, allochthonous matter, sedimentation, modelling, randomization

Received on: 01 June 2020
Published on: 26 June 2020

Summary: Climate changes on the territory of Karelia have led to an increase in the intake of allochthonous substances in water bodies. Over the past thirty years, the removal of dissolved and suspended humus substances, as well as iron and phosphorus in their composition, from the waters of the Shuya River to the Petrozavodsk Bay of Lake Onega has been growing. The brownification processes led to lower water quality and negatively impact on benthic communities. To estimate the volume of intake, removal and deposition of allochthonous substances that entered Lake Onega with the waters of the Shuya River, simulation modeling was applied. A number of model variants were constructed including data on three substances (iron, phosphorus, suspended substances) and a year-round cycle of water dynamics. The model parameters were the coefficients of transport and “disappearance" (sedimentation) of substances from the waters of the Petrozavodsk Bay. The parameters were adjusted based on field data on the chemical composition of river and lake waters for 1992–2018. The model calculates the concentrations of substances that are compatible to real data, and also makes it possible to estimate the amount of iron deposition, the main factor of inhibition of deep-water zoobenthos in Lake Onega. During the year, about 40 % of the iron received in the Petrozavodsk Bay is removed from the bay, about 30 % settles to the bottom, and 30 % is constantly present in the water. The distribution of substances in the bay changes significantly throughout the year. During the winter and spring there is a gradual increase in concentrations of allochthonous substances in the bay. After the end of the spring mixing the water of the Petrozavodsk Bay quickly replaced by those of the central reach, and concentrations of substances in the bay and adjacent lake area are aligned.