



УДК 556.013:502.51:504.5:6П1

Имитационная модель распространения загрязняющих веществ в водоемах, подверженных воздействию горнорудного производства

КАЛИНКИНА
Наталья Михайловна

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
kalina@nwpi.krc.karelia.ru*

КОРОСОВ
Андрей Викторович

*Петрозаводский государственный университет,
korosov@psu.karelia.ru*

Ключевые слова:

озерно-речная система
Карелия
горнорудное производство
ионы калия
распространение
имитационное моделирование

Аннотация:

Водоемы северной части Карелии загрязняются отходами Костомукшского железорудного горно-обогатительного комбината, главным компонентом которых являются ионы калия. С использованием методов имитационного моделирования изучены процессы распространения калия в озерно-речной системе р. Кенти и выполнена реконструкция данных для водоемов, где химические наблюдения не проводились. Рассчитаны параметры модели (константы переноса калия для семи озер), которые отражают характер гидрологического режима водоемов и характеризуют высокую интенсивность переноса калия в верхнем и нижнем течении и низкую – в среднем течении. Показано, что основное количество калия (около 70 %) выносится за пределы системы р. Кенти и поступает в оз. Среднее Куйто.

© 2015 Петрозаводский государственный университет

Рецензент: В. С. Безель
Рецензент: В. К. Шитиков

Опубликована: 16 октября 2015 года

Введение

Изучение изменения экологических систем, находящихся в условиях возрастающего загрязнения, предполагает детальное знание картины распространения поллютантов от источника выбросов. Примером такой ситуации могут послужить водоемы системы р. Кенти (северная часть Карелии), загрязняемые отходами горнорудного производства.

На протяжении 20 лет работы Костомукшского горно-обогатительного комбината, начиная с 1982 г., антропогенная нагрузка на водоемы р. Кенти все время возрастала. В первое десятилетие в водоемы поступали небольшие количества техногенных вод (около 2 млн м³ в год), а начиная с 1994 г. их количество увеличилось в 5–10 раз и варьировало от года к году (Лозовик и др., 2001). Основным компонентом техногенных вод является калий, который определяет основной токсический эффект на планктонных ракообразных водоемов системы р. Кенти (Калинкина и др., 2003).

Картина загрязнения всех озер на различных участках реки менялась во времени. В озерах системы р. Кенти сложилась ситуация, когда фронт загрязнения довольно быстро продвигался вниз по течению, захватывая все новые озера, одновременно концентрации загрязняющих веществ во всех

озерах возрастали и тем больше, чем ближе расположено озеро к источнику загрязнения (Морозов, 1998).

Для изучения картины загрязнения озер системы р. Кенти были использованы методы имитационного моделирования, позволяющие дать динамическую картину распространения загрязняющих веществ в водоемах (Коросов, 2002; Коросов, Калинкина, 2004; Калинкина и др., 2005).

Цель настоящих исследований – изучить распространение загрязняющих веществ и выполнить реконструкцию гидрохимических данных на основе имитационного камерного моделирования процессов переноса поллютантов в водоемах системы р. Кенти.

Материалы

Объект исследования

Система р. Кенти

Объектом исследования послужили процессы распространения загрязняющих веществ (ионов калия), поступающих с отходами Костомукшского горно-обогатительного комбината, в водоемах системы р. Кенти. Эта система состоит из 7 последовательно расположенных озер, связанных между собой порожистыми участками реки (рис. 1).

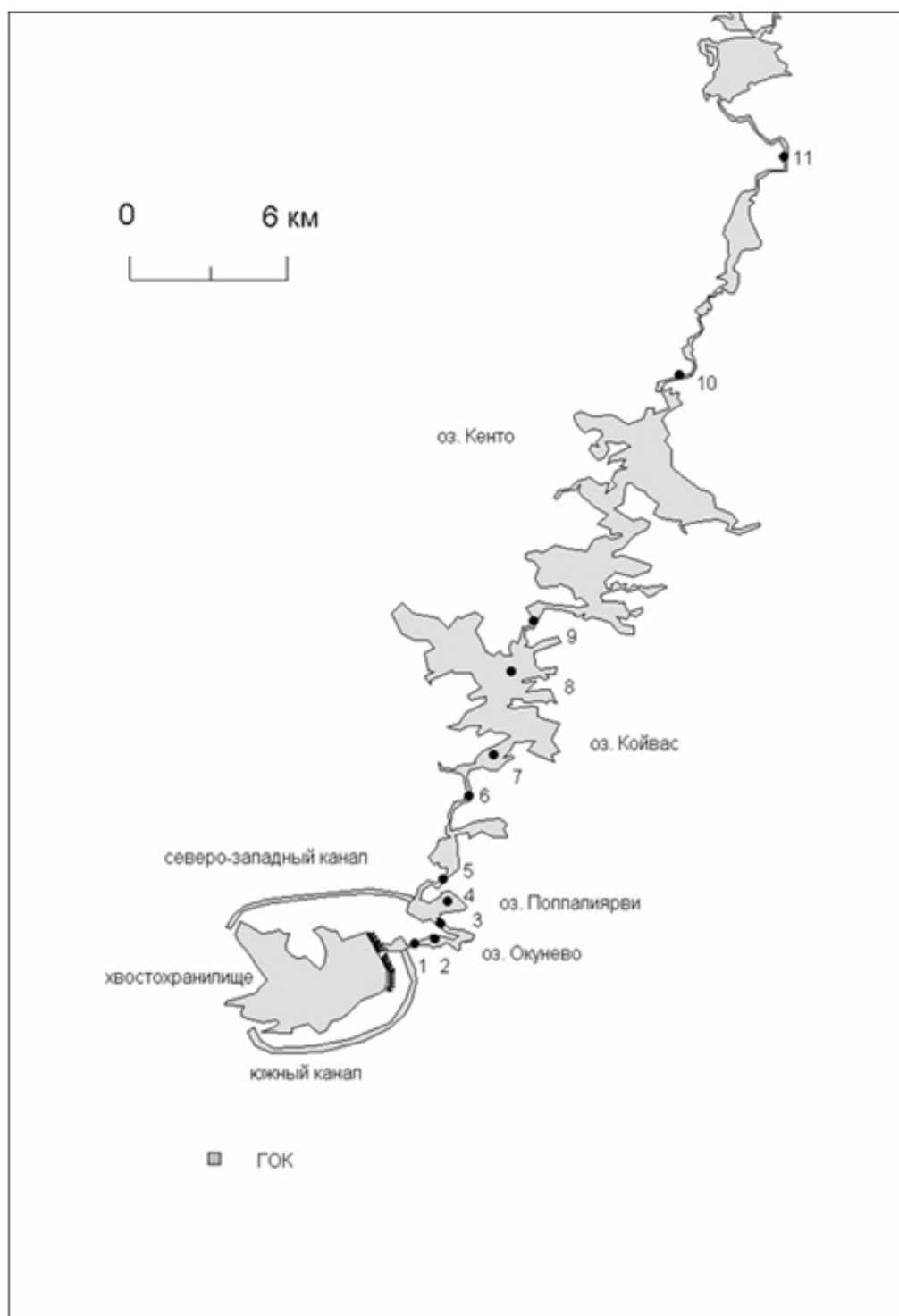


Рис. 1. Система реки Кенти (номера обозначены станции отбора гидрохимических проб)
Fig. 1. System of the River Kenty (numbers denote the stations of hydrochemical sampling)

Количество калия, поступившее в систему р. Кенти с техногенными водами

В расчетах использованы гидрохимические данные, которые были опубликованы в печати: количество калия, поступившее в систему р. Кенти с техногенными водами в 1983–2001 гг., а также данные по содержанию калия в озерах (Феоктистов, Сало, 1990; Пальшин и др., 1994; Сало и др., 1995; Морозов, 1998; Кухарев и др., 1998; Лозовик и др., 2001; Калинкина, 2002; Калинкина и др., 2002).

Базовыми данными для модельных расчетов содержания калия в озерах послужили сведения о количестве калия, поступившего с техногенными водами в систему р. Кенти.

Эта величина носит название «массовый поток сброса» и используется в качестве критерия

антропогенной нагрузки на экосистему (Бретшнайдер, Курфюрст, 1989).

Величину сброса калия в озера определяли на основе данных об объемах техногенных вод, поступивших в систему р. Кенти из хвостохранилища, южного обводного канала, северо-западного обводного канала в 1983–2001 гг., и концентрации в них калия.

Количество калия ($L_{\text{ТВ}}$, тонны), поступившего с техногенными водами в озера системы р. Кенти, рассчитывали как произведение концентрации калия в воде хвостохранилища или отводного канала ($[K_{\text{ТВ}}]$, мг/л) на объем воды, поступающей в озера из хвостохранилища или отводного канала ($V_{\text{ТВ}}$, млн м^3):

$$L_{\text{ТВ}} = [K_{\text{ТВ}}] \cdot V_{\text{ТВ}}.$$

Рассмотрим формирование трех источников поступления загрязняющих веществ в водоемы р. Кенти: хвостохранилище, южный водоотводной канал, северо-западный водоотводной канал (табл. 1).

Таблица 1. Объемы фильтрационных и техногенных вод (млн м^3), поступивших из хвостохранилища в озера системы р. Кенти в 1983–2001 гг.

Год	В оз. Окуновое фильтрационные воды	В оз. Окуновое воды через сбросной коллектор	В оз. Поппалиярви (через северо-западный канал)
1983	0.1	0	0
1984	0.1	0	0
1985	0.1	0	0
1986	0.6	0	0
1987	0.6	0	0
1988	0.6	0	0
1989	0.6	3	0
1990	2	0	0
1991	1.5	0	0
1992	2	0	0
1993	2	0	0
1994	2	8.89	0.67
1995	2	16.76	1.26
1996	2	13.56	0.94
1997	2	13.36	0.94
1998	2	20.88	2.08
1999	2	12.65	0.95
2000	2	14.23	1.07

Для складирования отходов обогащения руды верхнее озеро системы р. Кенти (оз. Костомукшское) было преобразовано в хвостохранилище. В 1979 г. была построена дамба, отделяющая хвостохранилище от озер системы р. Кенти. В этот же год в оз. Окуновое стали поступать фильтрующиеся сквозь дамбу воды. Объем фильтрационных вод начиная с 1988 г. стабилизировался на уровне 1.8–2 млн м^3 в год (см. табл. 1) (Пальшин и др., 1994).

Наряду с фильтрационными водами в оз. Окуновое посредством сбросного коллектора поступают техногенные воды из хвостохранилища. Разовый сброс техногенных вод в объеме 3 млн м^3 был произведен в 1989 г. Однако начиная с 1994 г. количество сбросов техногенных вод в озера системы р. Кенти существенно возросло. С целью предотвращения переполнения хвостохранилища в водоемы системы р. Кенти были начаты регулируемые сбросы техногенных вод, скопившихся в хвостохранилище. Их объем в 1994–2001 гг. варьировал в пределах 9.56–22.96 млн м^3 в год (Лозовик и др., 2001).

В 1982 г. был введен в строй южный водоотводной канал, по которому воды р. Кенти и основных притоков оз. Костомукшского поступают в оз. Окуновое. Площадь водосбора канала к 1993 г. составила 48.6 км^2 . С 1989 г. вводится в строй северо-западный канал, отводящий сток северных притоков бывшего оз. Костомукшского в р. Шуойоки и далее в оз. Поппалиярви. Площадь водосбора северо-западного отводного канала составила 25 км^2 .

Чтобы определить объемы воды, поступающие по каналам, использовали данные о площади водосбора этих каналов и среднему расходу воды для системы р. Кенти. По формуле определяли модуль стока для системы р. Кенти:

$$M_C = (Q_C / F_C) \cdot 1000,$$

где M_C – модуль стока для системы р. Кенти ($\text{м}^3/\text{с} \cdot \text{км}^2$); Q_C – средний расход воды в системе р. Кенти ($\text{м}^3/\text{с}$); F_C – площадь водосбора системы р. Кенти.

Величина среднего модуля стока для системы р. Кенти составила:

$$M_c = (8.21/949) * 1000 = 8.65.$$

Затем определили расходы воды в каналах по формуле:

$$Q_k = F_k * M_c / 1000,$$

где Q_k – средний расход воды в канале ($\text{м}^3/\text{с}$); F_k – площадь водосбора канала (км^2); M_c – модуль стока для системы р. Кенти ($\text{м}^3/\text{с} * \text{км}^2$).

Площадь водосбора южного канала составляет 48.6, северо-западного – 25 км^2 (Пальшин и др., 1994). Расчетные значения среднего расхода для каналов составили 0.42 и 0.22 $\text{м}^3/\text{с}$ соответственно, или в пересчете на год – 13.3 и 6.8 млн м^3 . Таким образом, ежегодные объемы техногенных вод, поступающих в 1983–2001 гг. из южного отводного канала в оз. Окуновое, а в 1989–2001 гг. в оз. Поппалярви, были приняты равными, соответственно 13.3 млн м^3 и 6.8 млн м^3 . В оз. Поппалярви, кроме того, в 1994–2000 гг. проводился дополнительный сброс воды из хвостохранилища в объеме 0.67–2.08 млн м^3 в год (см. табл. 1).

Концентрация ионов калия в фильтрационных водах была принята равной 143 ± 29 мг/л согласно данным определения за 1994–1999 гг. (Лозовик и др., 2001). Эта величина была использована при расчетах общего количества калия, поступившего с фильтрационными водами для всего периода исследования 1983–2001 гг.

Концентрация калия в техногенных водах, поступающих из хвостохранилища через сбросной коллектор, в 1989 г. составляла 100 мг/л (Пальшин и др., 1994), а для периода 1994–2001 гг. мы использовали данные определения за 1994–1999 гг., т. е. 129 ± 9 мг/л (Лозовик и др., 2001). Изменчивость концентрации калия в воде хвостохранилища в течение года невелика. Например, по данным лаборатории охраны природы Костомукшского ГОКа, в 2001 г. средняя концентрация калия в воде хвостохранилища составила 120 ± 3 мг/л. Невысокая изменчивость концентрации калия в воде хвостохранилища как в пределах одного года, так и для ряда последних лет является дополнительной гарантией точности расчетов сбросов калия при использовании среднесноголетнего его концентрации. Это тем более важно, что с массовыми сбросами техногенных вод в водоемы системы р. Кенти поступало основное количество калия – 60 % от всего количества этого загрязнителя, сброшенного из трех источников в систему р. Кенти в 1983–2001 гг.

Концентрация калия в водах южного отводного канала была принята за 30 мг/л, а в водах северо-западного канала – 20 мг/л – данные для низовья двух каналов в 1995 г. (Лозовик и др., 2001).

Ежегодное суммарное количество калия, поступавшее в водоемы системы р. Кенти в 1983–2001 гг., увеличивалось от 413 тонн в 1983 г. до 2054–3783 тонн в 1994–2001 гг. (рис. 2).

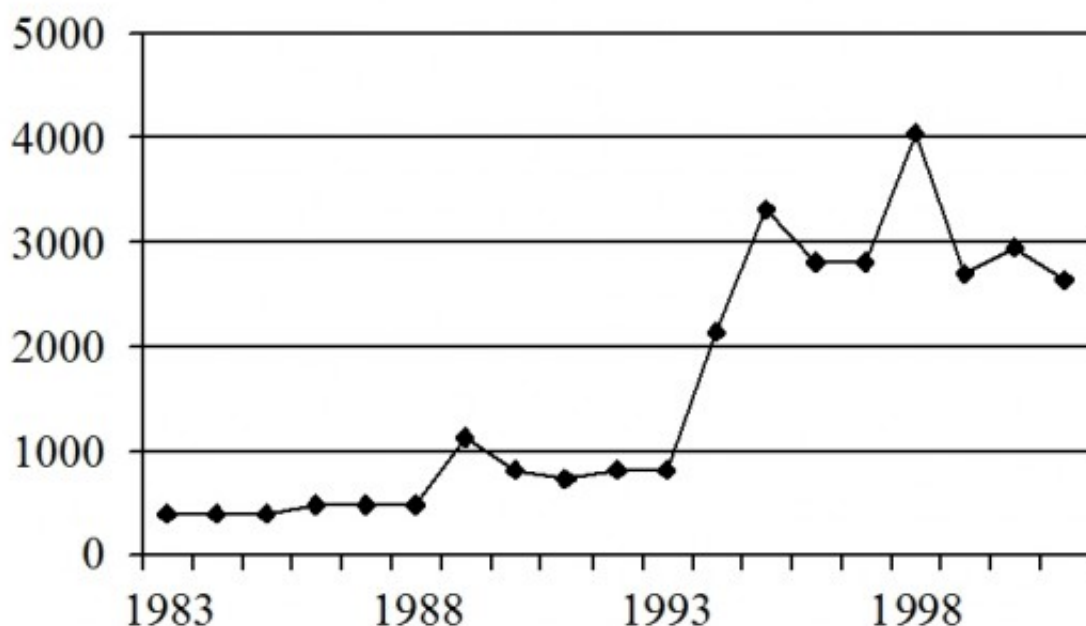


Рис. 2. Количество калия, поступившего в водоемы системы р. Кенти в разные годы (по оси

абсцисс – годы: по оси ординат – тонны)

Fig. 2. Amount of potassium incoming into the lakes of the River Kenty system in different years (horizontal axis is years: vertical axis is tons)

Содержание калия

Содержание калия в озерах (S_{O_3} , тонны) рассчитывали как произведение концентрации калия в пробе воды из озера ($[K_{O_3}]$, мг/л) на объем воды в озере (V_{O_3} , млн m^3):

$$S_{O_3} = [K_{O_3}] \cdot V_{O_3}.$$

Данные о среднемноголетних объемах воды в озерах заимствовали из источника (Лозовик и др., 2001). Содержание калия в озерах в различные годы варьировало в широких пределах и закономерно увеличивалось на протяжении 1984–2001 гг. (табл. 2).

Таблица 2. Содержание калия в семи озерах системы р. Кенти в 1984–2001 гг.

Год	Озеро*						
	1	2	3	4	5	6	7
1984	3.0	4.6	13.1	-	-	-	-
1985	2.9	9.2	17.1	76.3	51.6	8.2	10.3
1986	-	-	-	-	-	-	-
1987	15.8	19.1	33.2	210.7	103.1	-	-
1988	16.9	20.8	44.1	-	-	-	-
1989	45.9	66.0	133.7	730.2	-	-	-
1990	-	-	-	-	-	-	-
1991	16.3	-	100.8	501.8	350.6	50.8	64.2
1992	35.0	-	42.7	-	-	-	-
1993	41.4	57.4	77.6	358.5	-	-	-
1994	57.1	153.8	309.3	1749.1**	536.2	-	-
1995	54.9	-	437.9	1720.3	876.4	-	179.7
1996	77.3	-	389.8	2257.8	1546.4	196.8	-
1997	63.4	-	339.6	1863.7	1505.2	-	59.1
1998	-	-	-	-	-	-	-
1999	84.4	-	418.8	2060.9	1793.9	122.0	18.1
2000	45.0	-	413.0	2087.7	1598.1	247.6	33.5
2001	75.9	-	432.2	2087.7	1721.8	245.6	43.7

Примечание. * 1 – оз. Окунеевое; 2 – оз. Куроярви; 3 – оз. Поппалиярви; 4 – оз. Койвас; 5 – оз. Кенто; 6 – оз. Юляярви; 7 – оз. Алаярви; "-" – исследования не проводились;

** – для одного случая (1994 г., оз. Койвас) рассчитывали среднюю концентрацию калия по двум станциям (в северной и южной частях озера).

Методы

Подходы к моделированию процессов распространения загрязняющих веществ в водоемах системы р. Кенти

Для крупных водоемов разработка модели его экологической системы невозможна без его гидродинамической и термической моделей, что связано с необходимостью учета пространственной неоднородности крупных водных экосистем (Меншуткин, 1987). На основе знания водного баланса, а именно степени проточности озера и его глубины, основаны, например, модели, описывающие накопление фосфора (Хендерсон-Селлерс, Марклэнд, 1990). Для Каспийского моря прослежен перенос биогенных веществ с использованием данных по водному стоку (Леонов, Дубинин, 2001; Леонов, Назаров, 2001). Для изучения механизма переноса сульфатов в озере, загрязняемом дренажными стоками горнорудного производства, была разработана камерная модель, позволяющая на основе знания водного обмена между камерами рассчитать содержание сульфатов в каждой камере (Herlihy et al., 1998). Однако данный подход требует детального учета всех составляющих водного баланса, а также знания химического состава его компонентов.

Подробный учет гидрологической ситуации в озерах системы р. Кенти представляет собой довольно сложную задачу. Возможно, построение детальной гидрологической модели системы р. Кенти и позволило бы более точно предсказать концентрации загрязняющих веществ. Однако, чтобы получить полные данные о гидрологическом режиме всех озер системы р. Кенти, необходимо проведение объемных исследований, требующих слишком больших трудозатрат. Особую проблему представляет собой оценка весьма сложного характера распространения высокоминерализованных техногенных вод в котловинах озер системы р. Кенти, связанного с сезонной стратификацией.

На взгляд авторов, для выбора модели важна прежде всего конечная цель ее построения. В этом

аспекте нашим исследованиям вполне созвучна рекомендация, приведенная на стр. 3 монографии «Проблемы исследования и математического моделирования экосистемы Балтийского моря» (1987): «По мере развития теории и практики моделирования водных экосистем становится все более очевидным, что выбор типа модели должен определяться целями моделирования и назначением создаваемых моделей. При этом выборе следовало бы в большей степени руководствоваться осознанными задачами исследования и особенностями объекта, чем ограничениями или преимуществами того математического аппарата, которым владеет исследователь». Данная рекомендация была использована при построении имитационной модели распространения калия в водоемах системы р. Кенти. Подобный подход к объекту моделирования как к «черному ящику», когда исследователя не интересуют механизмы процесса, но важно оценить параметры «на выходе» по исходным данным «на входе», применяется давно (Одум, 1975). Наиболее полно поставленным в настоящем исследовании задачам отвечают принципы имитационного камерного моделирования (Безель, 1987; Коросов, 2002), позволяющие в явном виде отразить процессы переноса веществ в озерах системы р. Кенти.

При построении модели переноса загрязняющих веществ в водоемах системы р. Кенти были использованы следующие принципы камерного анализа:

1. Система состоит из конечного числа камер, связанных между собой потоками элемента.
2. В каждую камеру (рассматриваемый водоем) поступает загрязняющее вещество только из одной камеры (вышележащий водоем).
3. Все физико-химические реакции, в которых участвует изучаемое вещество, имеют первый порядок, т. е. количество элемента, покидающее камеру в единицу времени, пропорционально общему содержанию элемента в ней. Степень пропорциональности отражают константы переноса вещества.
4. Перемешивание поступающего вещества в камеру происходит мгновенно, поэтому концентрация его в любой точке камеры одинакова.

Решаемая относительно простая задача реконструкции позволяет ввести для модели следующие два основных допущения. Первое допущение состоит в том, что оценки концентраций химических веществ в воде гидросистемы для летнего периода служат репрезентативными характеристиками концентраций загрязнителей за год в целом. Летняя концентрация в каждом следующем по течению озере зависит не от летних концентраций в соответствующем верхнем озере, а от всех процессов, идущих в течение всех сезонов по переносу загрязняющего вещества в нижнее озеро. Данные по изменчивости концентрации калия в трех верхних озерах системы в 1993 и 1994 гг. заимствованы из работы А. К. Морозова (1998) и представлены на рис. 3.



Рис. 3. Изменчивость концентрации калия (мг/л) в озерах системы р. Кенти (Куроярви,

Поппаллярви и Койвас) в 1993 и 1994 годах (по оси ординат – концентрация ионов калия в озерах)

Fig. 3. Variability of potassium concentration (mg / l) in lakes of the River Kenty system (Kuroyarvi, Poppaliyarvi and Koyvas) in 1993 and 1994 (vertical axis is the concentration of potassium ions in the lakes)

Концентрация калия в каждом озере (Куроярви, Поппаллярви и Койвас) не имеет прямой связи ни с концентрацией калия в вышележащем водоеме, ни с концентрацией калия в этом же озере в предшествующий год, а отражает весь комплекс процессов (в том числе начало массовых сбросов техногенных вод), участвующих в переносе загрязнителей. Летняя концентрация является кумулятивной оценкой, характеристикой самых разнообразных процессов загрязнения за длительный предыдущий период. Летняя концентрация калия, например, в оз. Койвас определяется калием, который поступил из оз. Поппаллярви в этом году и в прошлые годы, из оз. Куроярви – в прошлом и более ранние годы и т. д., т. е. отдельная концентрация отражает многолетние кумулятивные процессы, оценкой которых и является летняя концентрация. Значение этой конкретной пробы репрезентативно только в контексте всего ряда, отражающего динамику концентраций в 7 озерах гидросистемы р. Кенти. Исходя из этого, игнорируя внутригодовые процессы перемещения загрязнителя, мы можем в качестве шага модели взять 1 год.

Второе допущение состоит в том, что поступивший загрязнитель в течение года равномерно перемешивается в озере, поэтому гидрохимические данные, получаемые на станции, расположенной на выходе из озера, характерны для всего водоема. Подтверждение этому состоит в том, что пробы, отобранные в разных частях каждого отдельного озера во все годы, когда проводились исследования, были близки по химическому составу. Конечно, в течение года, по-видимому, определенный градиент концентраций наблюдаться должен, особенно с учетом зимней стратификации. Например, он резко проявился в 1994 г. в оз. Койвас при начале массовых сбросов (для этого года были взяты средние концентрации по станциям), но в целом этот градиент практически не ощутим в условиях катастрофического загрязнения. Поэтому мы принимаем точку на выходе из озера вполне представительной для всей ситуации на водоеме в целом.

Структура модели переноса загрязняющих веществ в семи озерах системы р. Кенти

Как указывалось выше, в модели принципиальным оказывается именно игнорирование всех реальных гидрологических процессов перераспределения загрязняющего вещества в водоемах системы р. Кенти. В центр внимания попадают не частные процессы, но генеральный результат распространения отходов – более или менее устойчивое сохранение градиента концентраций загрязнителя в направлении от источника загрязнения (хвостохранилище) к нижним озерам системы р. Кенти. Таким образом, при построении модели учитывался перенос только вещества (в данном случае калия) без всякого расчета объемов переноса собственно воды водоемов.

Используя этот подход, каждое озеро системы р. Кенти рассматривается как камера. Связь между озерами выражается с помощью уравнений переноса калия. В простейшем случае проточной системы содержание вещества в каждой промежуточной камере (S_i) будет определяться тем количеством вещества, которое сохранилось в ней с предыдущего момента времени (S_{i-1}), поступило в камеру (Sp_i) и ушло из нее к текущему моменту времени (Sy_i):

$$S_i = S_{i-1} + Sp_i - Sy_i.$$

Каскад озер системы р. Кенти можно представить в виде серии из 8 проточных камер разного объема: от оз. Окуновое (камера № 1) до оз. Среднее Куйто (камера № 8) (рис. 4). Источники загрязнения обозначены прямоугольниками. Загрязняющие вещества поступают в р. Кенти тремя путями: из хвостохранилища и южного отводного канала – в оз. Окуновое; из хвостохранилища через северо-западный отводной канал – в оз. Поппаллярви.

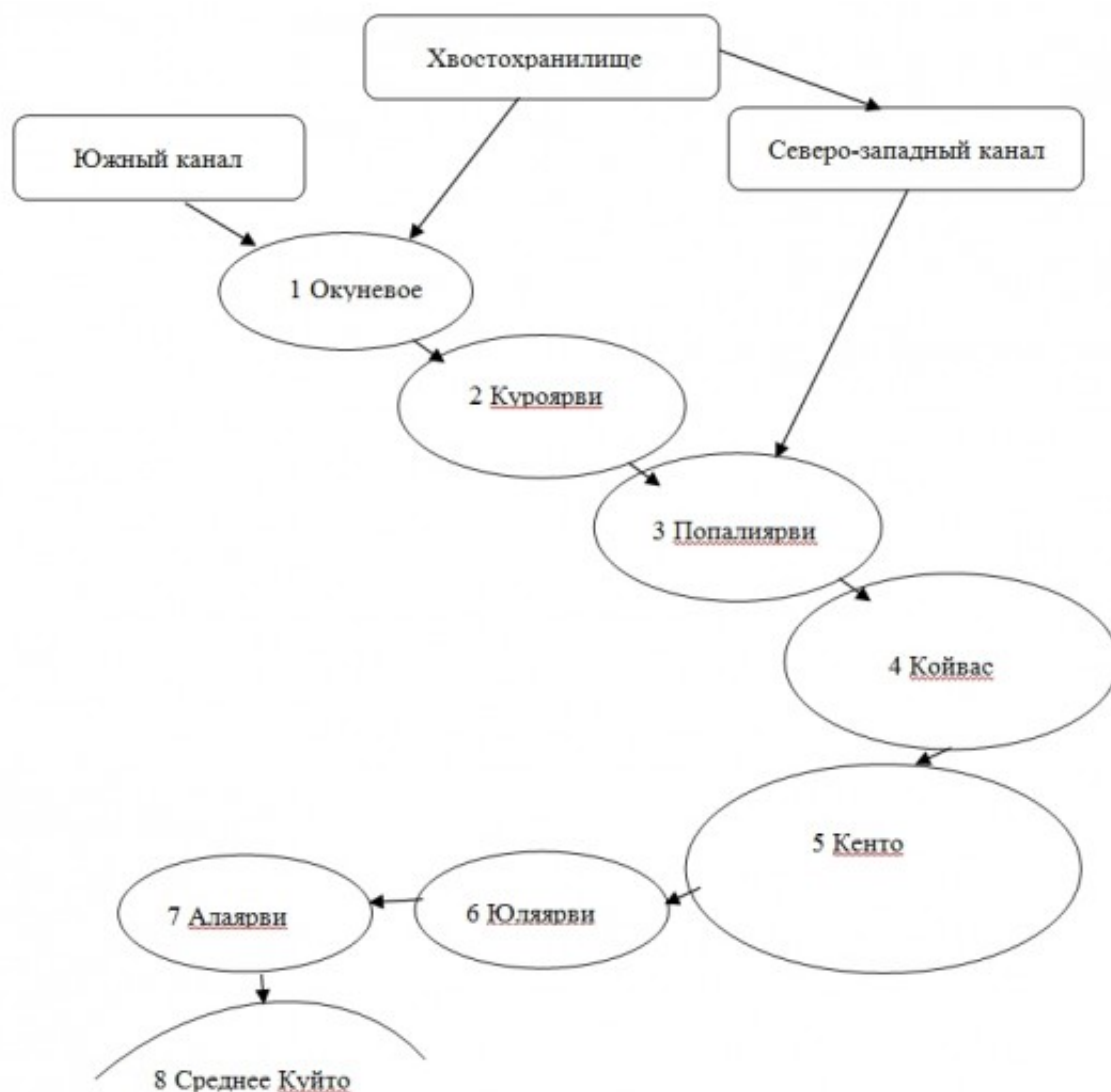


Рис. 4. Блок-схема модели переноса калия в озерах системы р. Кенти: прямоугольники – источники загрязнения озера; овалы – озера; стрелки – перенос калия

Fig. 4. Block diagram of the model of potassium transport in the lakes of the River Kenty system: rectangles are the sources of pollution in the lakes; ovals are the lakes; arrows indicate the transfer of potassium

В состав имитационной системы процессов переноса калия входят средства ввода и сохранения данных, программирования, отладки, настройки модели и презентации результатов (Коросов, 2002). В нашем случае имитационная система представлена следующими блоками:

1. Исходные независимые переменные;
2. Три блока расчетных формул (количество калия, поступившее в озеро; количество калия, вынесенное из озера; оставшееся количество калия);
3. Обобщение отличий расчетных значений от эмпирических данных;
4. Параметры модели;
5. Блок настройки модели (расчет констант переноса калия с использованием функции оптимизации);
6. Оценка адекватности модели;
7. Оценка статистических ошибок констант переноса.

Рассмотрим компоненты имитационной системы последовательно.

Расчет модельных зависимых переменных

Модель переноса калия в 7 озерах состоит из 7 алгебраических выражений:

$$S_{1i} = S_{1i-1} + S_{xx} + S_{юк} - K_{1/2} * S_{1i};$$

$$\begin{aligned} S_{2i} &= S_{2i-1} + K_{1/2} * S_{1i} - K_{2/3} * S_{2i}; \\ S_{3i} &= S_{3i-1} + S_{СЗК} + K_{2/3} * S_{2i} - K_{3/4} * S_{3i}; \\ S_{4i} &= S_{4i-1} + K_{3/4} * S_{3i} - K_{4/5} * S_{4i}; \\ S_{5i} &= S_{5i-1} + K_{4/5} * S_{4i} - K_{5/6} * S_{5i}; \\ S_{6i} &= S_{6i-1} + K_{5/6} * S_{5i} - K_{6/7} * S_{6i}; \\ S_{7i} &= S_{7i-1} + K_{6/7} * S_{6i} - K_{7/8} * S_{7i}, \end{aligned}$$

где S_{XX} – количество калия, поступающего со сбросами воды из хвостохранилища в оз. Окуновое;

$S_{ЮК}$ – количество калия, поступающего со сбросами воды из южного отводного канала в оз. Окуновое;

Окуновое;

$S_{СЗК}$ – количество калия, поступающего со сбросами воды из северо-западного отводного канала в оз. Поппалиярви;

$S_{1i}; S_{2i}; S_{3i}; S_{4i}; S_{5i}; S_{6i}; S_{7i}$ – количество калия в i -й год в озерах Окуновое, Куроярви, Поппалиярви, Койвас, Кенто, Юляярви и Алаярви (в камерах 1–7 соответственно);

$K_{1/2}; K_{2/3}; K_{3/4}; K_{4/5}; K_{5/6}; K_{6/7}; K_{7/8}$ – константы переноса калия между озерами. В нашей модели перераспределение вещества в речной системе выражается с помощью этих констант переноса. Конечно, данный процесс физически обеспечивается переносом воды, но в уравнениях камерной модели гидрологическую компоненту можно целиком исключить, сохранив лишь результат – расчет количества изучаемого вещества в водоемах.

Построение имитационной модели проводили в среде Excell с помощью табличного программирования. Формула имитационной модели в отдельной ячейке электронного листа может отражать приращение некоей функции за фиксированный отрезок времени, т. е. получать числовой дискретный анализ производной, характеризующей скорость процесса (модельный шаг, в нашем случае – год). Пошаговое суммирование всех частных эффектов (аналог интегрирования) дает динамику обобщающей функции (аналог первообразной). Таким образом, имитационное моделирование в среде Excell сохранило важнейшие функции дифференциальных уравнений – описание динамических систем (Коросов, 2002). В нашем случае приращение концентрации калия в каждом озере выражается через константу переноса калия из водоема, расположенного выше по течению. Суммирование содержания калия в озере за все годы исследования является аналогом интегрирования.

Всего организовано три блока расчетных формул: первый блок – «поступление», второй блок – «вынос» и третий блок – «остаток» (рис. 5).

Например, для оз. Окуновое в 1999 г. количество поступившего калия (P_{99}) в каждой ячейке первого блока рассчитывается по формуле:

$$P_{99} = L_{99} + O_{98},$$

где L_{99} – количество калия, поступившего в оз. Окуновое в 1999 г. с техногенными водами; O_{98} – количество калия, оставшееся в оз. Окуновое с 1998 г.

В блоке «вынос» количество вынесенного калия (V_{99}) определяется по формуле:

$$V_{99} = P_{99} * K_{OK},$$

где K_{OK} – константа переноса калия из оз. Окуновое в оз. Куроярви.

В блоке «остаток» содержатся расчетные значения содержания оставшегося калия (O_{99}) в озере в 1999 г., которые определяются по формуле:

$$O_{99} = P_{99} - V_{99}.$$

Все формулы расчета содержания калия в различных камерах располагаются на электронном листе пакета Excell. Ячейки одной строки содержат значения переменных за один год наблюдений, несколько строк отражают последовательную смену количества поллютанта в озерах за ряд лет.

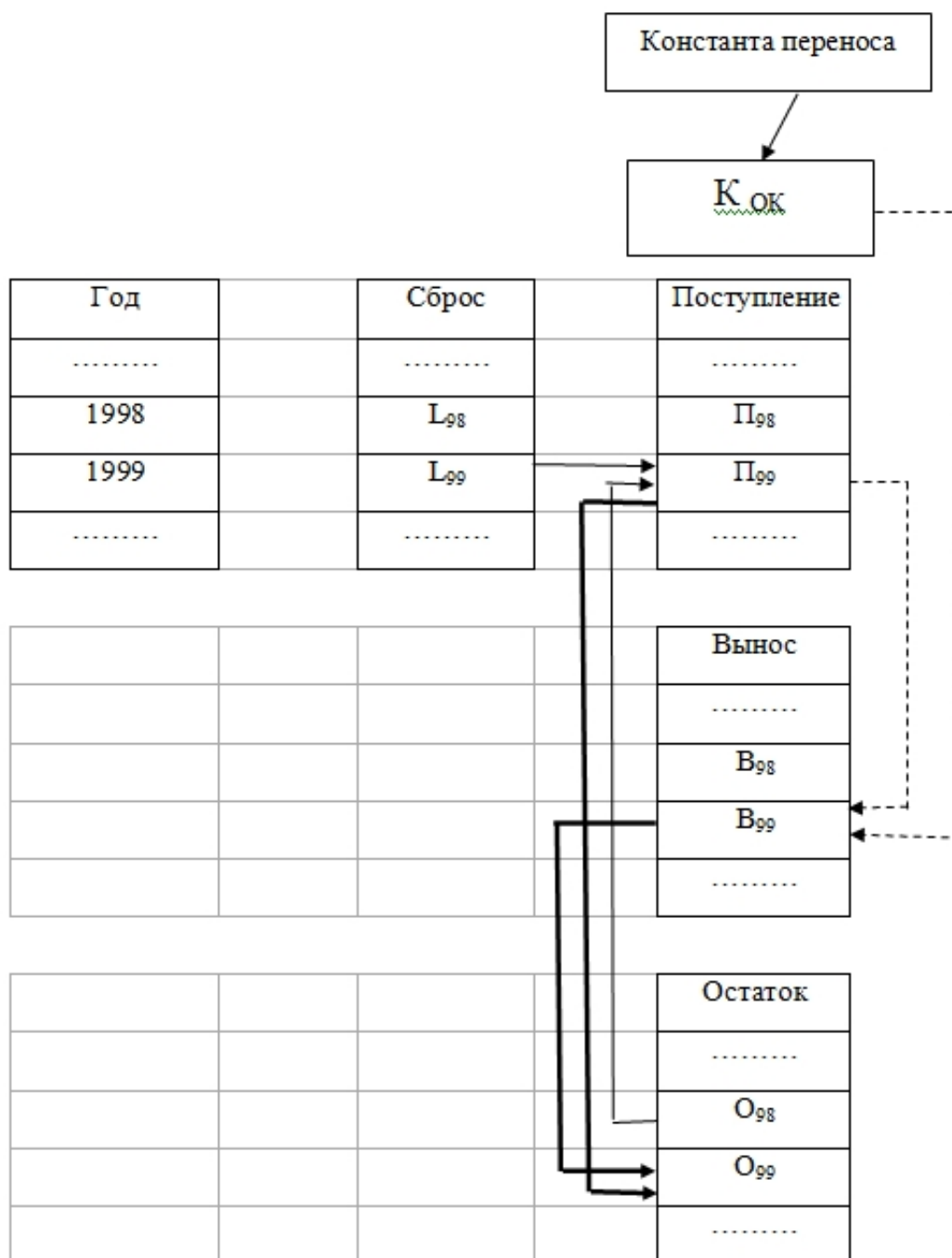


Рис. 5. Схема связи между тремя расчетными блоками в модели переноса калия; тонкие сплошные линии – блок «Поступление»; прерывистые линии – блок «Вынос»; толстые сплошные линии – блок «Остаток»

Fig 5. Scheme of communication between the three settlement blocs in the transport model of potassium; thin solid lines – block "Inflow"; dashed lines – block "Outlet"; thick solid line – block "Rest"

Блок функции отличий

Этот блок образован множеством формул, рассчитывающих различие каждой пары реальных (S) и модельных (S') значений содержания калия в озерах:

$$\phi = (S' - S)^2.$$

Сумма отличий по всем шагам образует искомую функцию отличий:

$$\Phi = \sum (S'_i - S_i)^2,$$

где i – индекс шага модели. Поскольку эмпирические значения содержания калия в озерах были

получены не для всех временных шагов, то исходный массив содержит пропуски (см. табл. 2). Например, для оз. Окуновое за период 1984–2001 гг. было произведено в разные годы 15 замеров концентрации калия, для оз. Куроярви – всего 7 определений и т. д. В этом случае значения квадратов разности в соответствующих строках (где отсутствуют эмпирические данные) не рассчитывали, т. к. модельные данные было не с чем сравнивать. Минимизация функции невязки была выполнена с учетом только имеющихся данных, настройка модели осуществлена по отдельным опорным точкам.

Для каждого озера рассчитывали одно значение функции невязки: всего семь значений. Настройка многокомпонентной модели связана с проблемой разного порядка различия моделируемых переменных. Например, для исследуемого ряда озер содержание калия заметно различается: для малых озер (Окуновое, Куроярви, Поппалиярви и др.) содержание калия относительно мало вследствие небольшого объема воды в них: в разные годы 3–430 тонн. В крупных озерах системы (Койвас и Кенто) содержание калия на порядок выше: в разные годы 50–2260 тонн – за счет больших объемов воды в этих водоемах.

При оценке разности между эмпирическими и модельными переменными большое значение имеет то, на сколько различается общее количество вещества в камере. Последнее, в свою очередь, зависит от объема камеры. Например, относительно большое различие (между модельным и реальным) значений для малого водоема – значительно существеннее, чем такое же по величине различие для большого водоема. Чтобы нивелировать различие водоемов по их объемам и тем самым устранить ошибку при расчете коэффициентов переноса, использовали объем каждого озера как весовой коэффициент. Сумму квадратов разности между модельными и реальными значениями содержания калия для каждого водоема делили на объем воды в этом озере. Такая операция позволяет выравнивать репрезентативность целевых функций (табл. 3). Общая сумма всех «взвешенных» сумм квадратов разностей и явилась функцией отличий. Эта сумма занимает отдельную ячейку и используется для настройки модели.

Таблица 3. Расчет взвешенных значений функции невязки для модели переноса калия в семи озерах

Показатель	Озеро						
	1	2	3	4	5	6	7
Сумма квадратов разностей	3020	2392	21189	818099	184495	12852	25372
Объем воды в озере, млн м ³	0.86	3.30	7.30	89.60	103.10	20.30	25.70
Частное	3512	725	2903	9131	1789	633	987
Функция отличий (сумма)	19680						

Примечание. 1 – оз. Окуновое; 2 – оз. Куроярви; 3 – оз. Поппалиярви; 4 – оз. Койвас; 5 – оз. Кенто; 6 – оз. Юляярви; 7 – оз. Алаярви.

Параметры модели

В рассматриваемой модели в качестве параметров используются константы переноса калия – всего 7, соответственно, в 7 парах озер. Константы численно равны доле калия, вынесенного из данного озера в ниже расположенный водоем в данный год. Величина каждой константы отражает механизмы переноса калия в рассматриваемой паре озер и является производной многообразных процессов переноса калия во всех семи озерах в течение наблюдаемого 19-летнего периода.

Блок настройки модели

Блок настройки служит для поиска параметров модели. Механизм настройки состоит в последовательном переборе различных значений параметров модели и выборе оптимальных из них, при которых модель показывает наилучшую сходимость расчетных и эмпирических значений переменных. В нашем случае сначала произвольно назначали величины констант переноса, которые бы удовлетворяли условиям $0 < K < 1$, и рассчитывали исходное значение функции невязки. Затем необходимо было изменить начальные значения параметров с целью минимизировать функцию невязки. Существуют эффективные алгоритмы быстрого поиска лучших значений параметров. Процедура заканчивается, когда функция отличий снизится до минимально возможного уровня, в идеале – до нуля. В пакете Excel находится встроенная программа оптимизации, которая вызывается командой «Поиск решения», с помощью которой и можно производить настройку модели. При минимизации функции невязки использовали метод Ньютона (Коросов, 2002).

Оценка адекватности модели

Оценку адекватности модели проводили с помощью дисперсионного анализа (Ивантер, Коросов,

1992). Поскольку одной из задач моделирования была реконструкция недостающих гидрохимических данных, то назначением модели было как можно более точно для каждого озера воспроизвести временной тренд изменения содержания калия в озерах, чтобы расчетные значения объемов калия находились как можно ближе к реальным.

Если для расчета критерия Фишера использовать всю выборку данных (по всем озерам), то в этом случае оценивалась бы адекватность описания моделью изменения концентрации калия в ряду озер. Поскольку градиент содержания калия в загрязненных и относительно чистых озерах очень велик, то величина критерия Фишера для модели, описывающей изменение концентрации калия в ряду всех озер, даже при относительно плохой сходимости модельных и эмпирических данных была бы большой, т. к. модельная дисперсия в этом случае будет всегда превышать остаточную дисперсию. При таком подходе трудно было бы ожидать точной реконструкции недостающих гидрохимических данных.

Чтобы решить проблему точного воспроизведения данных, оценивали адекватность описания моделью временного тренда изменения концентраций в каждом озере. Для этого величину критерия Фишера рассчитывали для 7 блоков данных по каждому озеру отдельно – всего 7 значений критериев.

При построении модели также решали задачу изучения процессов переноса калия во всей гидросистеме в целом, что было необходимо для расчета баланса калия, поступившего с техногенными водами и вынесенного за пределы р. Кенти в оз. Ср. Куйто. В этом случае оценивали адекватность модели, описывающей тренд концентраций в ряду озер на протяжении всего периода наблюдений, т. е. рассчитывали также критерий Фишера для всей выборки данных.

Оценка статистических ошибок констант переноса

При построении имитационных моделей важным условием их применения является оценка возможной изменчивости констант переноса. Для определения этого диапазона вычисляли стандартные отклонения для каждой константы. С этой целью вместо одного полного набора исходных данных (всего 72 промера по всем станциям за все годы) сформировали 15 массивов данных, содержащих по половине набора исходных значений, взятых из полного набора случайным образом (использовали встроенный в Excel датчик случайной величины). Каждый раз константы переноса рассчитывались по 36 случайно выбранным значениям.

Полученные выборки представляют собой частично пересекающиеся (частично зависимые) наборы данных. В литературе рекомендуется оценить изменчивость констант переноса по независимым наборам данных (Розенберг, 1984; Безель, 1987), но в нашем случае такие данные физически отсутствуют. По этим искусственно сформированным редуцированным блокам данных были настроены 15 серий констант переноса, и по ним – соответствующие стандартные ошибки для каждой константы.

Результаты

Результаты расчетов на основе имитационной модели переноса калия

Результаты расчетов показали, что для всего набора данных ($n = 72$) модель адекватна при $p < 0.001$. Кроме того проверяли пригодность модели для описания переноса калия в каждом водоеме по отдельности. Оказалось, что для всех пар озер, кроме пары оз. Алаярви – оз. Ср. Куйто, модель адекватна при $p < 0.01$.

Последний случай можно объяснить нестабильным гидрологическим режимом оз. Алаярви: концентрации калия в этом водоеме близки к фоновым и широко варьируют в силу естественных причин (Морозов, 1998). В любом случае загрязнение этого озера оказалось незначительным.

Константы переноса оказались разными для различных озер: наибольшие значения они имели для озер верхнего и нижнего течения, наименьшие – для озер среднего течения (табл. 4). Поскольку константы переноса отражают долю калия от его общего количества в озере, вынесенную в нижний водоем, то модель показала разную интенсивность переноса калия в озерах.

Таблица 4. Константы переноса калия и характеристика их изменчивости по частично зависимым наборам данных

Направление переноса	Константа переноса	Стандартная ошибка	p
Окуновое → Куроярви	0.97	0.001	< 0.01
Куроярви → Поппалиярви	0.93	0.001	<< 0.01
Поппалиярви → Койвас	0.88	0.001	<< 0.01
Койвас → Кенто	0.58	0.005	<< 0.01
Кенто → Юляярви	0.64	0.004	<< 0.01
Юляярви → Алаярви	0.93	0.003	<< 0.01

Алаярви → Ср. Куйто	0.99	0.006	> 0.2
---------------------	------	-------	-------

Характеристику возможной изменчивости констант переноса дает стандартная ошибка. Оказалось, что константы переноса имеют весьма низкую изменчивость, т. е. достаточно точно характеризуют способность озер пропускать через себя калий (см. табл. 4).

Несмотря на то, что константы характеризуют процесс переноса калия, они имеют вполне определенный гидрологический смысл и объяснение: коэффициент переноса тем больше, чем меньше период водообмена (условный временной отрезок, за который объем воды в озере полностью обновляется) (Григорьев и др., 1965). В озерах с наибольшим периодом водообмена (Койвас и Кенто) поступающие техногенные воды задерживаются и аккумулируются (наименьшие константы переноса). В озерах с наименьшими периодами водообмена (Окуновое, Куроярви, Поппалиярви, Юляярви, Алаярви) техногенные воды проходят транзитом (наибольшие константы). Иными словами, параметры камерной модели пропорциональны гидрологическим характеристикам озер: они характеризуют проточность озера, а ионы калия можно, по-видимому, рассматривать как маркеры стока в озере (рис. 6).

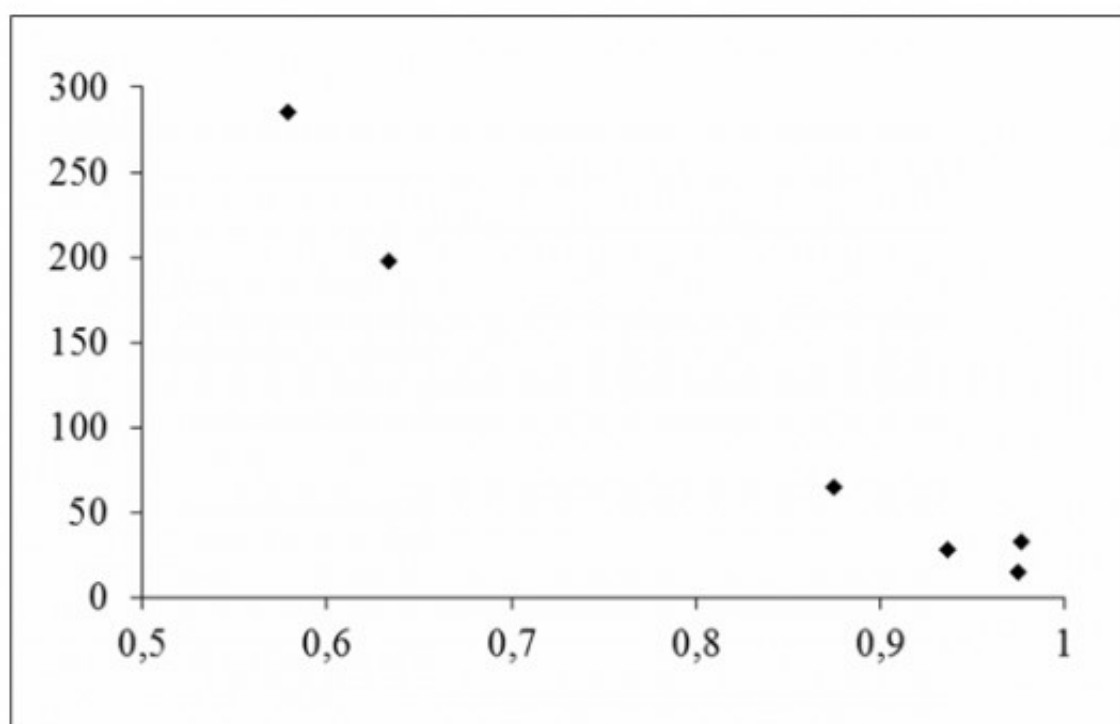


Рис. 6. Соотношение констант переноса (ось абсцисс) и периодов условного водообмена (ось ординат)

Fig. 6. Ratio between transfer constants (horizontal axis) and the suppositive period of water exchange (vertical axis)

Реконструированные и реальные значения содержания калия находятся весьма близко друг к другу. Для примера на рис. 7 приведены эмпирические и расчетные данные для озер Окуновое, Куроярви, Поппалиярви и Койвас.

На протяжении 1983–2001 гг. содержание калия во всех озерах непрерывно возрастает. Например, если в первые десять лет (1983–1993 гг.) содержание калия в верхних озерах системы составляло 10–112 тонн, то в 1994–2001 гг. его значения достигали 50–400 тонн. В озерах среднего течения р. Кенти (Койвас и Кенто) также происходит рост содержания калия. В первое десятилетие содержание калия в этих озерах составляло 70–600 тонн, а в 1994–2001 гг. – 670–2256 тонн. Наконец, в озерах нижнего течения (Юляярви и Алаярви) содержание калия возрастает от 2–56 тонн (1983–1993 гг.) до 25–207 тонн (1994–2001 гг.).

Рассмотренная модель переноса калия позволила рассчитать некие средние уровни содержания калия в озерах. Для использования реконструированных химических данных в экологических

исследованиях необходимо было оценить их возможную вариабельность. Эту задачу решали путем расчета содержания калия на основе измененного исходного набора данных, из которого случайным образом удаляли половину значений. Сформировав 15 таких редуцированных выборок, получали 15 значений содержания калия в каждой точке отбора проб для каждого года.

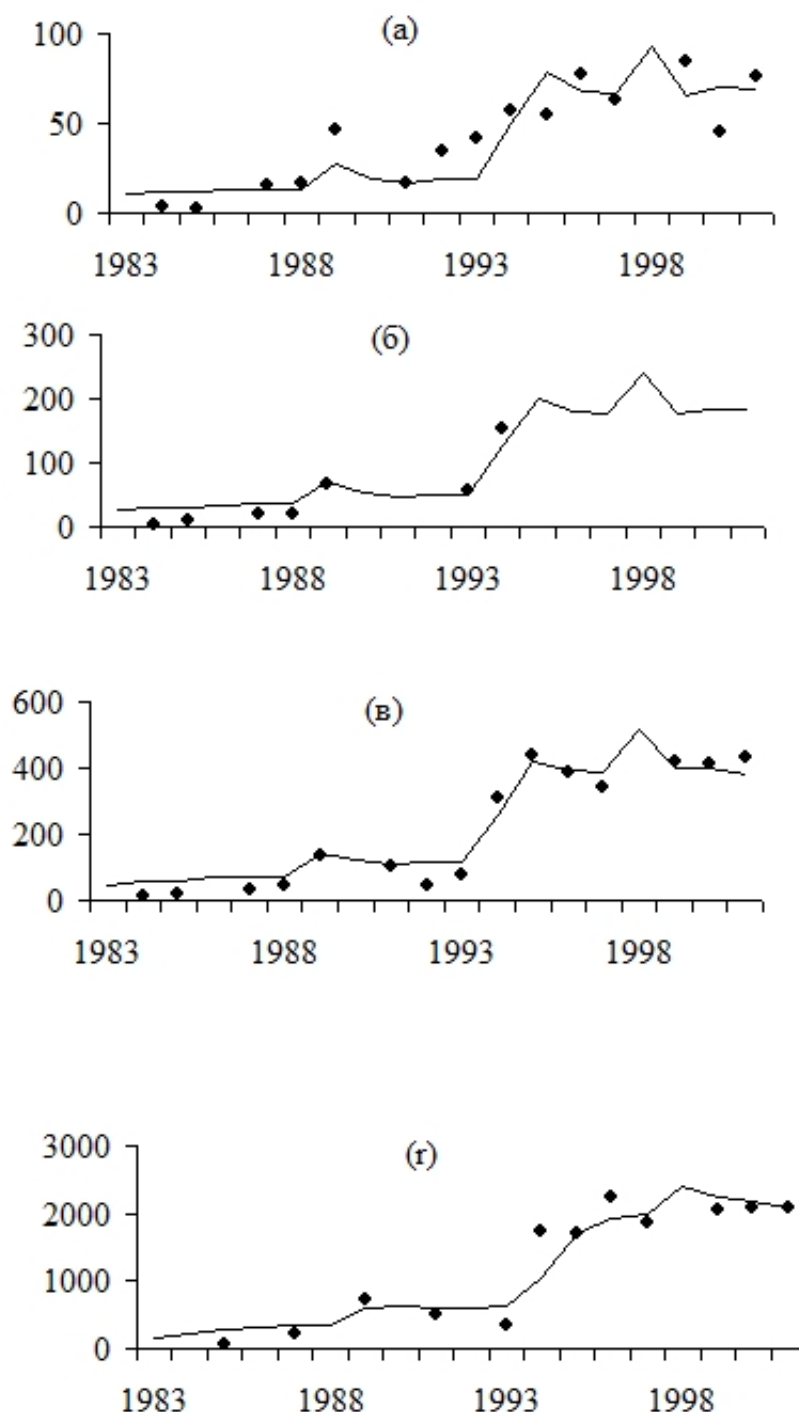


Рис. 7. Содержание калия (тонны) в озерах системы р. Кенти в 1983–2001 гг.; а – оз. Окунеево; б – оз. Куроярви; в – оз. Поппалиярви; г – оз. Койвас (точки – эмпирические данные; линии – расчетные значения)

Fig. 7. The potassium amount (tonnes) in the lakes of the River Kenty system in 1983–2001; а – Okunevoe; б – Kuroyarvi; в – Poppaliyarvi; г – Koyvas (point – the empirical data; line – calculated values)

Для полученного массива значений вычисляли стандартную ошибку и определяли доверительный интервал варьирования при уровне значимости $p = 0.05$ (табл. 5).

Таблица 5. Среднее значение (М) и доверительный интервал ($\pm 2m$) содержания калия (тонны) в озерах Окуновое, Куроярви, Поппалиярви и Койвас в 1983–2001 гг. (уровень значимости $p = 0.05$)

Год	Озеро							
	Окуновое		Куроярви		Поппалиярви		Койвас	
	М	$\pm 2m$	М	$\pm 2m$	М	$\pm 2m$	М	$\pm 2m$
1983	11.1	0.6	27.4	3.5	47.3	1.3	142.1	2.3
1984	11.4	0.7	30.0	4.0	57.8	1.6	235.2	3.9
1985	11.5	0.7	30.2	4.0	59.5	1.7	280.6	5.3
1986	13.4	0.8	34.9	4.6	67.9	1.9	325.6	6.4
1987	13.4	0.8	35.4	4.7	69.7	2.0	350.7	7.3
1988	13.4	0.8	35.4	4.7	70.0	2.0	362.4	7.8
1989	26.9	1.5	68.5	9.0	144.5	4.0	591.2	11.0
1990	19.2	1.1	51.8	7.0	125.0	3.7	631.9	12.8
1991	17.1	1.0	45.4	6.1	111.5	3.3	609.0	13.4
1992	18.9	1.1	49.6	6.6	117.0	3.4	615.6	13.7
1993	19.0	1.1	50.0	6.7	118.4	3.4	622.6	13.9
1994	49.9	2.8	125.9	16.5	260.8	7.2	1053.6	19.7
1995	78.1	4.4	200.4	26.5	417.2	11.6	1710.1	30.7
1996	67.7	3.9	179.9	24.1	396.4	11.5	1932.5	38.0
1997	66.8	3.8	176.2	23.6	387.2	11.3	2001.5	42.1
1998	92.9	5.3	240.1	31.8	515.1	14.6	2415.6	49.1
1999	65.0	3.8	175.8	23.8	401.8	12.0	2255.1	50.4
2000	69.7	4.0	183.1	24.5	402.1	11.7	2186.1	49.8
2001	68.9	4.0	181.7	24.3	382.2	11.1	2096.6	48.4

Статистическая ошибка средних значений содержания калия в озерах системы р. Кенти была мала и составляла 1–5 % от средней для озера Окуновое, Поппалиярви, Койвас, Кенто и Юляярви; для оз. Куроярви – 7 % (в связи с минимальным количеством наблюдений на этом водоеме). Для последнего озера в системе – Алаярви – ее величина составила 11 %, что отражает высокую изменчивость гидрологического и гидрохимического режима в этом водоеме. В целом для гидросистемы средние расчетные содержания калия имеют стабильный характер: удаление из выборки даже половины данных практически не привело к заметному изменению результатов расчетов. Значит, модельные значения содержания калия вполне репрезентативно отражают картину загрязнения водоемов системы р. Кенти.

Обсуждение

Первая попытка проследить формирование качества воды озера Окуновое и Койвас при поступлении больших количеств техногенных вод относится к 1990 г. (Феокистов, Сало, 1990). В этой работе с помощью регрессионной степенной модели изучалось изменение суммы ионов и концентрации ионов калия в озерах системы р. Кенти. С использованием данной модели были рассчитаны прогнозные концентрации калия в озерах Окуновое и Койвас на 1, 2 и 3 год после начала сбросов (т. е. в 1995, 1996 и 1997 гг.). Однако эмпирические и расчетные данные не совпадали. Так, расчетные концентрации в оз. Окуновое в 1995–1997 гг. составили одно и то же значение – 95 мг/л, в то время как эмпирические данные оказались разными: 63.5 мг/л (1995 г.); 90 мг/л (1996 г.) и 73.7 мг/л (1997 г.). Еще больше расходятся прогнозные и наблюдаемые данные для оз. Койвас: в 1995 г. 4.6 и 19.2 мг/л соответственно; в 1996 г. – 5.0 и 25.2 мг/л; в 1997 г. – 5.1 и 20.8 мг/л. Таким образом, в оз. Койвас наблюдались значительно большие концентрации калия, чем это предсказывалось на основе модели.

Другая модель прогнозной оценки последствий сброса техногенных вод в водоемы системы р. Кенти, основанная на уравнениях водно-солевого баланса озера, была предложена в 1995 г. (Сало и др., 1995). В модели учитывался сброс техногенной воды двумя путями (через сбросной коллектор в оз. Окуновое и по отводной трубе в северо-западный канал и далее в оз. Поппалиярви). В качестве расчетного шага в модели был выбран один месяц. Расчет среднемесячных концентраций калия в озерах был произведен на основе следующих исходных данных: объемы техногенных вод, концентрация калия в техногенных водах и разбавление техногенной воды в озерах за счет естественного притока с водосбора, задаваемого через месячную норму стока, площадь водосборов озера и фоновой концентрации калия в приточных водах. Данная модель дает общее представление о внутригодовой динамике концентрации калия в озерах в зависимости от разных объемов сброса техногенных вод. С

помощью модели было установлено, что верхние небольшие озера системы достаточно быстро реагируют на сбросы техногенных вод, в то время как относительно большее оз. Койвас вследствие замедленного водообмена продолжает накапливать калий даже при отсутствии сбросов из хвостохранилища. Однако эта модель, призванная учитывать гидрологические процессы, тем не менее не рассматривает перемешивания и расслаивания вод по плотности, изменения уровней и объемов воды в озерах. Учет только части из важных процессов переноса водных масс не позволил выполнить точную модельную реконструкцию ситуации, что и привело к несовпадению расчетных и эмпирических данных по содержанию калия в озерах: расчетное содержание калия для некоторых месяцев оказалось существенно ниже наблюдаемых в действительности. Так, в марте 1994 г. в озере Окуновое наблюдаемая концентрация калия составляла 100 мг/л. Расчетные значения калия для данного месяца составляли в этом водоеме 50–75 мг/л (расчеты производились по разным вариантам модели).

В отличие от представленных конструкций, в нашей имитационной модели сложные явления круговорота воды в озерно-речной системе р. Кенти вообще не рассматривались, моделировались лишь процессы переноса загрязняющего вещества (из озера в озеро) безотносительно к тому, что этот перенос осуществляется водой. Во внимание принимался только факт переноса загрязнителя, но не несущего его субстрата, воды. Подобный подход успешно применяется при изучении переноса веществ между органами в живом организме (Безель, 1987), при исследовании распространения загрязнителей атмосферы (Бретшнайдер, Курфюрст, 1989), а также использован нами при изучении переноса загрязняющих веществ в Кондопожской губе Онежского озера (Литвинова, Коросов, 1998).

Разработанная имитационная модель, используя одни и те же константы переноса, адекватно реконструирует динамику распространения калия в озерах при разных режимах сброса техногенных вод – как при небольших объемах (до 1994 г.), так и при массовых сбросах (после 1994 г.) (прогнозные и реальные значения содержания калия находятся весьма близко друг к другу). Фактически динамика содержания калия в озерах по годам отражает изменения в режиме сброса техногенных вод.

Кроме решения главной задачи по реконструкции гидрохимических данных, модель позволяет получить важную дополнительную информацию, необходимую для понимания механизмов процессов загрязнения, протекающих как в водоемах системы р. Кенти, так и за ее пределами. В частности, был рассчитан вынос калия в оз. Среднее Куйто, в которое впадает р. Кенти. Всего за 1983–2001 гг. в водоемы поступило 29362 тонны калия, из них в пределах системы р. Кенти осталось 7439 тонн, значит, в оз. Среднее Куйто поступило за исследуемый период 21923 тонны. Поступление такого большого количества калия привело к увеличению концентрации калия в оз. Среднее Куйто с 1.0 до 1.4 мг/л. Пока воздействие техногенных вод на оз. Среднее Куйто проявляется слабо за счет большого разбавляющего эффекта природными водами.

Заключение

1. Камерная модель переноса калия в озерах системы р. Кенти адекватно ($p < 0.01$) отражает действие генерального фактора – многолетнюю динамику поступления техногенных вод из хвостохранилища Костомукшского ГОКа.

2. Модель позволяет объяснить уникальность наблюдаемого случая загрязнения природных вод, когда в системе озер сформировался ярко выраженный градиент концентрации загрязняющих веществ, что позволяет наблюдать весь спектр реакции биоты на разную степень нарушения химического состава воды.

3. Параметры модели (константы переноса калия) пропорциональны гидрологическому режиму 7 озер системы р. Кенти и характеризуют высокую интенсивность переноса калия в верхнем и нижнем течении и низкую – в среднем течении.

Библиография

Безель В. С. Популяционная экотоксикология млекопитающих [Population ecotoxicology of mammals]. М.: Наука, 1987. 130 с.

Бретшнайдер Б., Курфюрст И. Охрана воздушного бассейна от загрязнений [Protection of air against pollution]. Л.: Химия, 1989. 288 с.

Григорьев С. В., Фрейндлинг В. А., Харкевич Н. С. Озера и реки Карелии и их особенности [Lakes and rivers of Karelia and their features] // Фауна озер Карелии. М.; Л.: Наука, 1965. С. 21–41.

Калинкина Н. М., Коросов А. В. Имитационная модель распространения загрязняющих веществ в водоемах, подверженных воздействию горнорудного производства // Принципы экологии. 2015. № 3. С. 40–59. DOI: 10.15393/j1.art.2015.4101

Ивантер Э. В., Коросов А. В. Основы биометрии: введение в статистический анализ биологических явлений и процессов [Fundamentals of Biometrics: introduction to the statistical analysis of biological phenomena and processes]. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1992. 168 с.

Калинкина Н. М., Куликова Т. П., Морозов А. К., Власова Л. И. Причины техногенного изменения сообщества пресноводного зоопланктона [Causes of anthropogenic changes in freshwater zooplankton community] // Известия АН. Серия Биологическая. 2003. № 6. С. 747–753.

Калинкина Н. М. Прогноз состояния популяций гидробионтов при нарушении ионного состава воды [Prognosis of aquatic organisms populations in the conditions of the water ions composition disturbance] // Экология. 2002. № 1. С. 32–35.

Калинкина Н. М., Коросов А. В., Морозов А. К. Оценка критических уровней минерального загрязнения речной системы с использованием имитационного моделирования [Evaluation of mineral contamination critical levels for the river system using simulation methods] // Экология. 2005. № 6. С. 477–480.

Калинкина Н. М., Кухарев В. И., Горьковец В. Я., Раевская М. Б., Морозов А. К. Техногенное изменение состава природных вод севера Карелии [Technogenic changing of natural water composition in the northern part of Karelia] // Геоэкология. 2002. № 4. С. 333–339.

Коросов А. В. Имитация экологических объектов в среде Excel [Imitation of environmental objects in Excel] // Экология. 2002. № 2. С. 144–146.

Коросов А. В., Калинкина Н. М. Камерная модель переноса калия [Box model of potassium transport] // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Материалы международной конференции, Апатиты, 31 августа – 3 сентября, 2004 г. Ч. 2. Апатиты, 2004. С. 163–164.

Кухарев В. И., Калинкина Н. М., Дубровина Л. В., Рябинкин А. В., Власова Л. И., Морозов А. К., Лозовик П. А. Комплексная оценка эколого-техногенной нагрузки (Костомукшский ГОК) на водные системы (р. Кент) [Integrated assessment of ecological and anthropogenic impact (Kostomukshsky GOK) on aquatic systems (river Kenty)] // Инженерная экология. 1998. № 6. С. 33–41.

Леонов А. В., Дубинин А. В. Взвешенные и растворенные формы биогенных элементов, их соотношение и взаимосвязь в основных притоках Каспийского моря [Suspended and dissolved forms of biogenic elements, their relationship and interdependence in the main tributaries of the Caspian Sea] // Водные ресурсы. 2001. Т. 28. № 3. С. 261–279.

Леонов А. В., Назаров Н. А. Поступление биогенных веществ в Каспийское море с водным стоком рек [Nutrient inputs into the Caspian Sea with a water river flow] // Водные ресурсы. 2001. Т. 28. № 6. С. 718–728.

Литвинова И. А., Коросов А. В. Имитационное моделирование распространения сточных вод КЦБК в Кондопожской губе Онежского озера [Simulation modeling of Kondopozhskiy pulp-and-paper mill wastewater spreading in Kondopozhskaya Bay of Lake Onego] // Антропогенное воздействие на природу Севера и его экологические последствия. Апатиты, 1998. С. 116–118.

Лозовик П. А., Маркканен С. Л., Морозов А. К., Платонов А. В., Потапова И. Ю., Калмыков М. В., Куринная А. А., Ефременко Н. А. Поверхностные воды Калевальского района и территории Костомукши в условиях антропогенного воздействия [Surface waters of Kalevala region and Kostomuksha territory under anthropogenic impact]. Петрозаводск: Изд-во Карельского НЦ РАН, 2001. 168 с.

Меншуткин В. В. Имитационные модели больших водных экологических систем [Simulation models of large aquatic ecosystems] // Проблемы исследования и математического моделирования экосистемы Балтийского моря. Моделирование компонентов экосистемы. Вып. 3. Л.: Гидрометеиздат, 1987. С. 76–97.

Калинкина Н. М. , Коросов А. В. Имитационная модель распространения загрязняющих веществ в водоемах, подверженных воздействию горнорудного производства // Принципы экологии. 2015. № 3. С. 40–59. DOI: 10.15393/j1.art.2015.4101

Морозов А. К. Озерно-речная система Кенти. Химический состав воды [Lake-river system Kenty. Water chemistry] // Современное состояние водных объектов Республики Карелия. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1998. С. 129–133.

Одум Ю. Основы экологии [Fundamentals of Ecology]. М.: Мир, 1975. 740 с.

Пальшин Н. И., Сало Ю. А., Кухарев В. И. Влияние Костомукшского ГОКа на экосистему р. Кенти. Гидрологические и гидрохимические аспекты [Impact of Kostomukshsky Mining on the ecosystem of the river Kenty. Hydrological and hydrochemical aspects] // Использование и охрана водных ресурсов бассейна Белого моря (в границах Карелии). Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1994. С. 140–161.

Розенберг Г. С. Модели в фитоценологии [Models in phytocenology]. М.: Наука, 1984. 265 с.

Сало Ю. А., Пальшин Н. И., Кухарев В. И. Модель разбавления воды хвостохранилища Костомукшского ГОКа в водоемах системы Кенти – Кенто [Model of dilution of Kostomukshsky Mining wastewaters in the lakes of Kenty – Kento system] // Влияние техногенных вод горно-обогатительного комбината на водоемы системы реки Кенти. Петрозаводск: Изд-во Карельского НЦ РАН, 1995. С. 8–15.

Феоктистов В. М., Сало Ю. А. Режим эксплуатации хвостохранилища Костомукшского ГОКа [The regime of operation of the Kostomukshsky Mining tailings]. Петрозаводск: Изд-во Карельского НЦ РАН, 1990. 42 с.

Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х.Р. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования [Dying lakes. Causes and control of anthropogenic eutrophication]. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 279 с.

Herlihy A. T., Mills A. L., Lung W. Modeling sulfate retention in a lake receiving acid mine drainage // Mine drainage and sulfate mine reclamation. 1998. P. 262–268.

Simulation model of pollution spreading in the water bodies affected by mining mill

KALINKINA
Natalia

*Northern Water Problems Institute, KRC RAN,
kalina@nwpi.krc.karelia.ru*

KOROSOV
Andrey

Petrozavodsk state university, korosov@psu.karelia.ru

Keywords:

lake-river system
Karelia
iron ore-dressing mill
potassium ions
spreading
simulation modelling

Summary:

Water bodies of the northern Karelia are polluted by liquid wastes of Kostomukshsky iron ore-dressing mill. The main components of these wastes are potassium ions. The processes of the potassium spreading in lake-river system of the River Kenty were studied using simulation modeling. For water bodies, where chemical observations were not carried out, the reconstruction of data was realized. The parameters of the model (constants of potassium transfer for seven lakes) were calculated. These constants reflect the hydrological regime of water bodies and characterize high-speed transfer of potassium in the upstream and downstream, and low transfer rate - in the middle stream. It is shown that the vast majority of potassium (70%) is carried out of the system Kenty and enters the lake Srednee Kuito

References