

ПРИМЕНЕНИЕ ФУНКЦИЙ ЖЕЛАТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ВОДЫ

© 2012 г. М. Б. Зобков

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра

Российской академии наук

185030 Петрозаводск, просп. А. Невского, 50

Поступила в редакцию 06.07.2010 г.

Разработан метод поиска аномалий в химическом составе воды с использованием функций желательности. Метод позволяет в автоматизированном режиме оценивать степень отклонения химического состава воды от среднерегionalных величин, полученных по данным натурных наблюдений для незагрязненных водных объектов региона. С использованием этого метода выявлены аномальные отклонения ионного состава воды и форм N от среднерегionalных значений для некоторых водных объектов Республики Карелия (система р. Кенти, водные объекты Заонежского п-ова, Онежское оз.), обусловленные как антропогенным влиянием, так и специфическими природными условиями формирования химического состава воды.

Ключевые слова: химический состав воды, анализ качества, функции желательности, Онежское оз., водные объекты Заонежского п-ова, р. Кенти.

В настоящее время в связи с загрязнением водной среды все бóльшую актуальность приобретает вопрос оценки ее качества и возможности применения воды для конкретных видов водопользования, а также выявления антропогенного влияния на состояние водных объектов. Оценка качества воды в общем виде заключается в получении некоторого обобщенного количественного показателя, учитывающего множество значимых элементов, имеет свой физический смысл, пределы изменения и размерность. Чтобы объединить частные показатели качества воды, каждому из них необходимо поставить в соответствие некоторую безразмерную шкалу. Таким образом, первоочередная задача при оценке качества воды заключается в решении вопроса о выборе соответствующих шкал. Вторая важная задача — выбор правил комбинирования частных индексов качества в некоторый обобщенный показатель.

Метод функций желательности [1] может быть применен для оценки качества воды и пригодности водных объектов для различных видов водопользования. Однако, как и для любой подобной задачи, функции желательности не являются строго детерминированными, а процесс выбора соответствующих шкал для них не формализован. Один из важных этапов в процессе оценки качества водных объектов региона — выявление рек и озер, подверженных антропогенному влиянию, либо характеризующихся специфическими условиями формирования химического состава водных ресурсов, которые не типичны для изучаемого района.

Экспертное выявление таких объектов зачастую трудноосуществимо в связи с имеющейся гидрохимической информацией и требует высокой квалификации специалистов. Для обнаружения такого рода объектов автором предложен метод определения аномалий химического состава воды с помощью функций желательности, который позволяет оценить отклонение химических параметров от их среднерегionalных значений, полученных статистически по материалам натурных исследований.

Для решения поставленных задач необходимо определить вид функций желательности, разработать метод построения шкал для различных элементов химического состава воды и процедур объединения частных индексов в некоторый обобщенный показатель.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Значения большинства химических показателей воды изменяются в широком диапазоне концентраций, что создает значительные сложности при формировании соответствующих шкал и определении оптимального (“желаемого”) их значения. Однако многие химические показатели воды находятся в тесной связи с другими, что позволяет объединять их в группы и проводить комплексную оценку для каждой из этих групп. Способ выражения доли катионов и анионов в химическом составе воды в процент-эквивалентной форме позволяет отразить связи между концентрациями главных ионов (HCO_3^- ,

$A_{\text{орг}}^{-}$, SO_4^{2-} , Cl^{-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} , включая NH_4^{+} и NO_3^{-} , как компонентов ионного состава), и использовать их для оценки степени аномальности состава воды. Содержание различных форм N ($N_{\text{орг}}$, NO_3^{-} , NH_4^{+} , NO_2^{-}), выраженное в мг N/л, можно выделить в отдельную группу показателей, характеризующую круговорот N в водной среде и степень обеспеченности водоема соединениями N.

Содержание главных ионов в воде во многом определяется особенностями геологического строения территории, однако при интенсивной хозяйственной деятельности на водосборе минеральный состав воды может в значительной степени измениться. Поскольку большая часть территории Республики Карелия мало освоена в хозяйственном отношении, а антропогенное загрязнение водных объектов носит в основном локальный характер, для оценки степени аномальности ионного состава воды наиболее “желательными” значениями выбраны среднерегionalные процент-эквивалентные концентрации. При этом следует учесть, что для некоторых ионов (таких как Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^{-} и $A_{\text{орг}}^{-}$) наблюдается высокая вариабельность значений. В то же время их полное отсутствие или абсолютное преобладание одного из ионов не характерно для поверхностных вод. Для водных объектов гумидной зоны исключение составляют гидрокарбонаты и анионы органических кислот, концентрации которых могут изменяться в широких пределах (от десятков %-эквивалентов до полного отсутствия), что является характерным признаком их вод. В связи с этим следует учитывать сумму эквивалентной доли HCO_3^{-} + $A_{\text{орг}}^{-}$. Поэтому главные ионы природных вод, а также NH_4^{+} и NO_3^{-} были разбиты на две группы. К первой отнесены Ca^{2+} , Mg^{2+} и HCO_3^{-} + $A_{\text{орг}}^{-}$ в связи с их повсеместным распространением и обязательным присутствием в незагрязненных водных объектах (региональный фон), ко второй – ионы Na^{+} , K^{+} , NH_4^{+} , NO_3^{-} , SO_4^{2-} и Cl^{-} , повышенная концентрация которых может быть следствием минерального загрязнения или аномального природного содержания. Для первой группы ионов необходимо найти функцию желательности с двухсторонним ограничением, для второй подойдет функция с односторонним ограничением. Общее требование к этим функциям – их непрерывность в пределах от 0 до 1. При поиске аномалий для форм N важный параметр функции желательности – ее монотонность и симметричность.

С помощью методов математического анализа были выбраны соответствующие функции, удовлетворяющие этим требованиям. Для первой

группы ионов функция желательности имеет следующий вид:

$$f(x) = \ln\left(\cos\left(\pi x - \frac{\pi}{2}\right)\right); \quad x \in (0, 1), \quad (1)$$

для второй группы и форм N

$$f(x) = \text{th}(x), \quad (2)$$

где $f(x)$ – функция желательности, x – значение показателя. Далее для переноса этих функций в область определения, соответствующую “желаемым” значениям показателей, в уравнения кривых были введены необходимые коэффициенты. Они выбирались так, чтобы при аномальных отклонениях показателей от среднерегionalных фоновых значений функции принимали значение 1, а когда таких отклонений не наблюдалось, они принимали значение 0. Одни из ключевых параметров функций желательности – точки минимума и перегиба, поэтому в уравнения полученных функций были введены также коэффициенты, позволяющие задавать положение этих точек. Это позволило при определенных допущениях привести выходные значения функций к двоичной системе (при округлении функции до ближайшего целого в результате получаем ноль в случае отсутствия отклонения и единицу при его наличии, что значительно упрощает работу с ними в режиме автоматизированной обработки). С учетом этих преобразований уравнения функций (1) и (2) приобретают следующий вид:

$$f(x) = -\frac{1}{4} \ln\left[\cos\left(\pi x^{\log_{1/2} C} - \frac{\pi}{2}\right)\right], \quad x \in (0, 1), \quad (3)$$

$$f(x) = \frac{\text{th}\left[8x^{\log_A 0.316} - 4\right] + 1}{2}. \quad (4)$$

Как видно из рис. 1а, функция (3) имеет минимум в точке С, которая соответствует среднерегionalным значениям эквивалентной доли ионов в поверхностных водах Карелии, не подверженных значительному антропогенному влиянию. Среднерегionalные значения эквивалентной доли ионов ($C_{Ca^{2+}} = 0.44$, $C_{Mg^{2+}} = 0.32$, $C_{A_{\text{орг}}^{-} + HCO_3^{-}} = 0.72$) для Карелии были заимствованы из работы [3]. При отклонении эквивалентной доли иона от среднерегionalной значение функции желательности, отражающее степень аномалии по этому иону, резко возрастает. Нулевое значение функции соответствует среднерегionalному фону, 1 – аномальному содержанию. Для гидрокарбонатов и анионов органических кислот в случае малого их содержания функция может принимать значения >1. В этом случае значение функции приравняется 1.

Функция (4) (рис. 1б) – гладкая, равномерно возрастающая в пределах от 0 до 1 и имеет одну точку перегиба. Коэффициент А – средняя эквивалентная доля иона по Карелии, она соответствует значению 0.05 функции желательности и принима-

ет следующие значения: $A_{Na^+} = 0.20$, $A_{K^+} = 0.04$, $A_{NH_4^+} = 0.01$, $A_{SO_4^{2-}} = 0.17$, $A_{NO_3^-} = 0.005$ и $A_{Cl^-} = 0.11$ [3].

Соединения N – важные биогенные вещества и в значительной степени влияют на трофический статус водоема. В водных объектах процессы взаимного преобразования различных форм N происходят постоянно, и их содержание в незагрязненных поверхностных водах Карелии достаточно стабильно и может быть представлено следующим неравенством [6]:

$$N-NO_2^- \ll N-NH_4^+ < N-NO_3^- \leq N_{орг}, \quad (5)$$

$$<0.005 \quad <0.05 \quad 0.05-0.3 \quad 0.2-0.7 \text{ мг N/л.}$$

Благодаря этому представляется возможным выполнить поиск аномалий в распределении форм N, основываясь на принципе сбалансированного их соотношения в поверхностных водах.

На основании неравенства (5) получены следующие пределы колебаний процентных отношений для различных форм N от общего:

$$N-NO_2^- \ll N-NH_4^+ < N-NO_3^- \leq N_{орг}, \quad (6)$$

$$0/4-1/6\% \quad 4-16\% \quad 6-54\% \quad 36-87\%.$$

Коэффициенты в уравнении (2) для NO_2^- , NH_4^+ и NO_3^- принимаются так, чтобы максимальные доли каждой из форм соответствовали значению 0.5 функции желательности. Для $N_{орг}$ нормируется нижний интервал его изменения, в связи с этим его минимальной доле соответствует значение 0.5 функции, а аргумент входит в ее уравнение с отрицательным знаком. Коэффициенты при числе π отвечают за скорость роста функции в промежутке от 0 до 1. Ширина этого промежутка выбиралась так, чтобы она соответствовала ширине интервала изменения процентного содержания форм N от 25 до 75 перцентилей для выборки данных из более 800 водных объектов Карелии. При этом были получены следующие уравнения для функций желательности (рис. 1в):

$$N-NO_2^- : f_{NO_2^-}(x) = \frac{1}{2}(\text{th}(160\pi(x - 0.016)) + 1),$$

$$N-NH_4^+ : f_{NH_4^+}(x) = \frac{1}{2}(\text{th}(16\pi(x - 0.16)) + 1), \quad (7)$$

$$N-NO_3^{2-} : f_{NO_3^{2-}}(x) = \frac{1}{2}(\text{th}(12\pi(x - 0.54)) + 1),$$

$$N-N_{орг} : f_{N_{орг}}(x) = \frac{1}{2}(\text{th}(16\pi(-x + 0.36)) + 1).$$

Такой подход, учитывающий не абсолютное значения показателя, а его относительную долю по отношению к общей концентрации элементов подобного типа, четче отражает отклонение химического состава воды от среднерегионального значения вследствие внутренних связей между его составляющими.

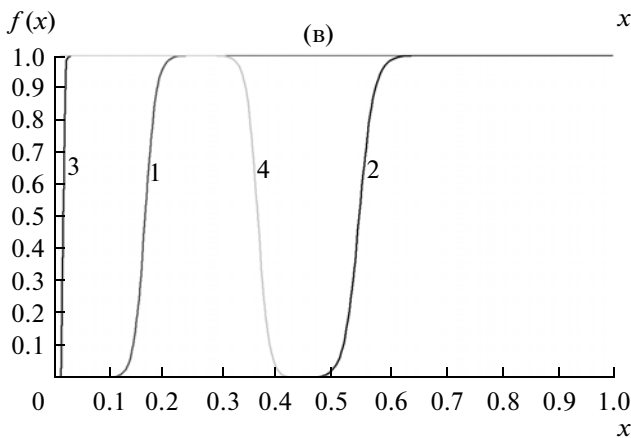
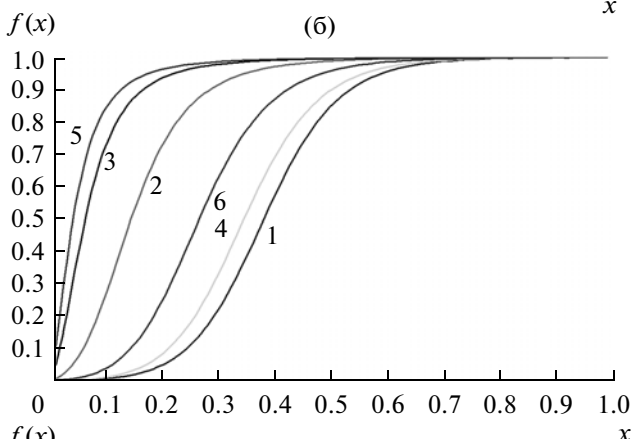
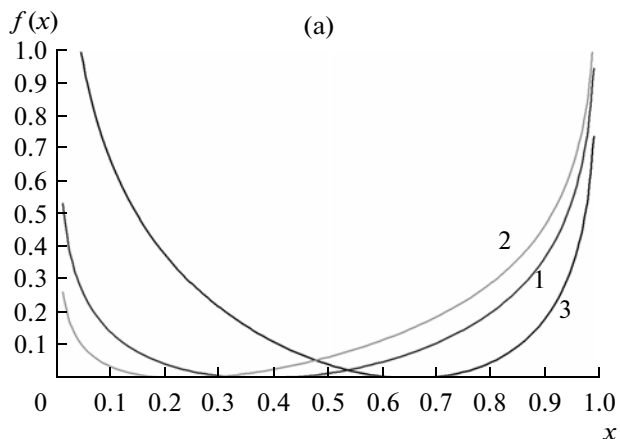


Рис. 1. Графики функций желательности для ионов Ca^{2+} (1), Mg^{2+} (2), $HCO_3^- + A_{орг}$ (3) (а); Na^+ (1), K^+ (2), NH_4^+ (3), SO_4^{2-} (4), NO_3^- (5), Cl^- (6) (б); форм азота NH_4^+ (1), NO_3^- (2), NO_2^- (3), $N_{орг}$ (4) (в).

Отдельные показатели аномалии, вычисляемые непосредственно по формулам (3), (4), (7), использовались для детального анализа ситуации, а также для выяснения того, по какому из показателей обнаружена аномалия.

Для оценки степени аномалии по всем параметрам использовались интегрированные индексы химического состава воды, которые вычислялись как

среднегеометрическое значение для двух оцениваемых характеристик: аномального распределения главных ионов и форм N. В общем виде формула для вычисления интегрального индекса аномальности I для каждой характеристики выглядит следующим образом:

$$I = 1 - \sqrt[m]{(1 - f(x_1))(1 - f(x_2)) \dots (1 - f(x_m))}, \quad (8)$$

где $f(x_1) \dots f(x_m)$ – значения функции желательности для каждого показателя. Формула (8) построена так, что при $f(x_k) = 1$ ($k = 1 \dots m$) интегральный индекс составляет значение 1, а при $f(x_k) = 0$ или $f(x_k) \ll 1$ они не вносят существенного вклада в этот индекс. Данная формула позволяет вычислять интегральный индекс аномальности состава воды, имеющий тот же смысл, что и частные значения функции желательности, – если $I = 1$, то наблюдается высокая степень аномалии химического состава, если $I = 0$, то аномалии отсутствуют.

Достоинство предложенного метода заключается в простоте его алгоритмизации и возможности применения при автоматизированном анализе состояния водных объектов [2, 10]. Применение метода поиска аномальных отклонений ионного состава воды проиллюстрировано для водных объектов озерно-речной системы р. Кенти, подверженных техногенному влиянию Костомукшского горно-обогатительного комбината (ГОК). Аномалии в распределении форм N показаны на примере сравнительно чистых водных объектов Заонежского п-ова. Для Онежского оз., испытывающего многофакторное антропогенное воздействие и остающегося одним из самых чистых озер Карелии, показано комплексное применение двух предложенных методов.

Водные объекты р. Кенти (Северная Карелия) подвергаются сильному антропогенному влиянию в результате поступления техногенных вод Костомукшского ГОК. Здесь сосредоточены основные мощности по добыче железосодержащей руды открытым способом и ее переработке. Поступления техногенных вод в систему р. Кенти происходят в результате попусков и фильтрации вод из хвостохранилища и с отвалов. Главные источники загрязняющих веществ (ЗВ), поступающие в систему р. Кенти, – контролируемые попуски вод из хвостохранилища, осуществляемые с 1994 г., фильтрация вод через тело плотины, а так же воды, дренирующие отвалы вскрышных пород, которые поступают через северо-западный обводной канал непосредственно в систему р. Кенти. Ежегодно в результате попусков из хвостохранилища в систему сбрасывается от 10 до 20 млн. м³ воды в зависимости от водности года (включая ~2 млн. м³ фильтрационных вод) [4].

Заонежский п-ов ограничен на западе и северо-западе бассейном р. Уницы, на севере и северо-востоке – Повенецким зал. Онежского оз., на восто-

ке – Заонежским зал., на юге – Великой губой и зал. Большое Онего.

Одна из особенностей озер Заонежья в гидрологическом отношении – весьма малый их удельный водосбор и достаточно замедленный водообмен (от 1 года до 10 лет), что связано с высокой расчлененностью рельефа. Поэтому в режиме этих озер следует ожидать существенную роль атмосферных осадков в водном питании и внутриводоемных процессов в формировании химического состава воды. На территории Заонежского п-ова располагаются уран-ванадиевое месторождение Средняя Падма и Зажогинское месторождение шунгитов [5].

Онежское оз. относится к крупным глубоководным водоемам. Территория юго-западного побережья озера наиболее развита в хозяйственном отношении. Тремя крупными промышленными центрами (Петрозаводск, Кондопога, Медвежьегорск) непосредственно в озеро сбрасывается 104 млн. м³ сточных вод в год [8]. Основной источник поступления органических, минеральных и взвешенных веществ – Кондопожский, биогенных веществ – Петрозаводский промышленные центры, а Медвежьегорский центр отличается отсутствием очистных сооружений сточных вод. Однако в связи с небольшим объемом поступления сточных вод от Медвежьегорского промцентра его вклад в общий вынос ЗВ незначителен [8]. Около 50% общего объема сточных вод приходится на сточные воды Кондопожского целлюлозно-бумажного комбината [7]. Изменение гидрохимического режима проявляется значительно всего в крупных заливах озера – Кондопожском, Петрозаводском и Большой губе Повенецкого зал. – приемниках сточных вод основных промышленных центров.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для системы р. Кенти наиболее характерно минеральное загрязнение, и для нее были выявлены аномалии в ионном составе воды (рис. 2). Наибольшее отклонение ионного состава от региональных значений наблюдается для ионов K^+ и SO_4^{2-} , содержание которых в природных поверхностных водах Карелии незначительно. Как видно из табл. 1, эквивалентные доли ионов K^+ и SO_4^{2-} остаются высокими на протяжении всего русла реки от хвостохранилища до оз. Среднее Куйто, в котором техногенные воды подвергаются наибольшему разбавлению, что и влечет за собой уменьшение в ионном составе доли K^+ и SO_4^{2-} как консервативных показателей. В верхних водоемах системы также отмечено высокое загрязнение NO_3^- (до 8 мг N/л), при этом их доля в ионном составе достигала 6.3%-экв. Однако вниз по течению реки их содержание уменьшается быстрее, чем эквивалентные доли K^+ и SO_4^{2-} (рис. 2). Этот процесс наиболее заметен в летний период,

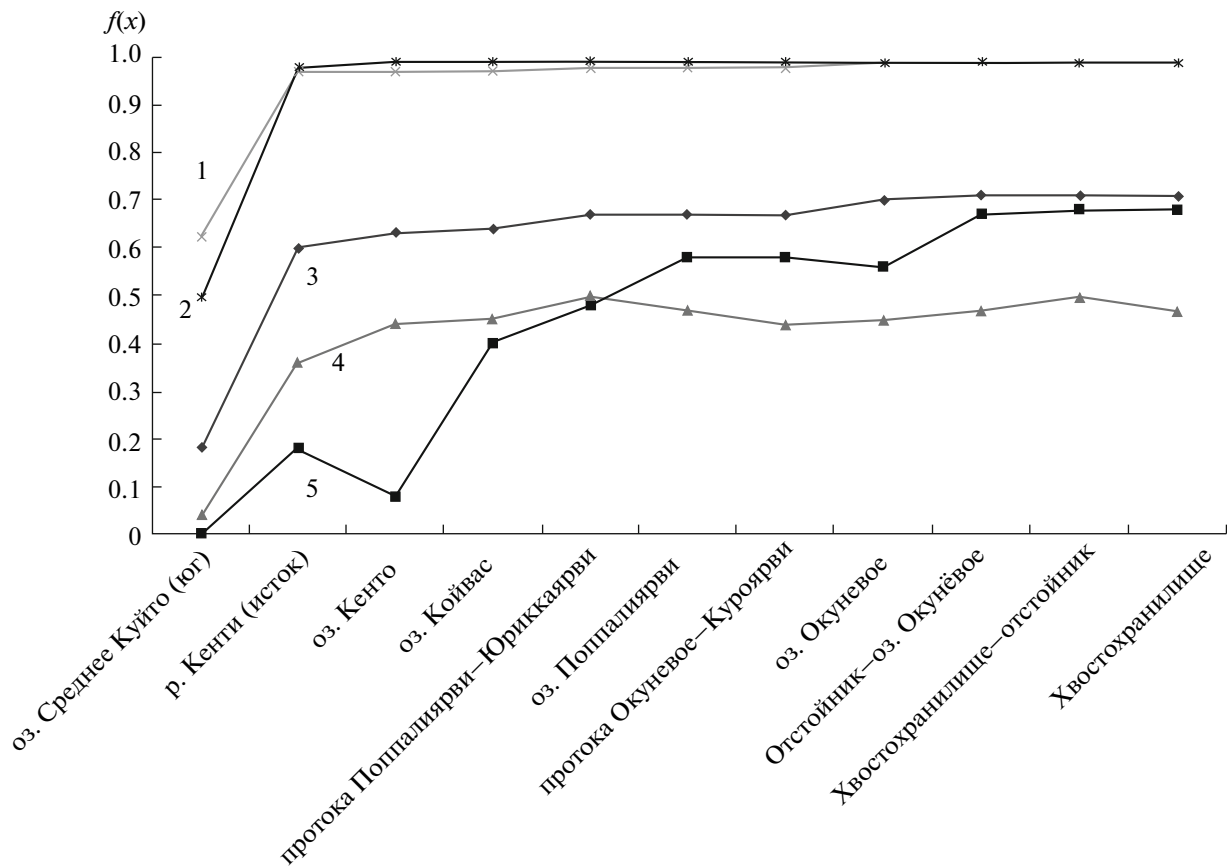


Рис. 2. Индексы аномалии ионного состава системы р. Кенти (летний период 2008 г.). 1 – K⁺, 2 – SO₄²⁻, 3 – NO₃⁻, 4 – HCO₃⁻ + A_{орг}⁻, 5 – интегральный индекс.

когда происходит наибольшее потребление NO₃⁻ в процессе новообразования органического вещества (ОВ), и уже в оз. Окуневом соответствующий NO₃⁻ коэффициент аномалии становится < 0.4.

Интегральный индекс, соответствующий общей аномальности ионного состава воды, практически для всех станций наблюдений оставался > 0.5, что соответствует сильному внешнему влиянию на водные объекты системы р. Кенти. Несмотря на то, что интегральный индекс аномальности, рассчитанный для оз. Среднее Куйто (I = 0.18), находится ниже порогового значения (0.5), все же для K⁺ и SO₄²⁻ частные индексы (0.62 и 0.5 соответственно) (табл. 1) отражают повышенное их содержание в водах озера по сравнению с геохимическим фоном.

Объекты Заонежского п-ова не подвержены значительному антропогенному влиянию, и отклонения в содержании химических веществ от их среднерегionalных значений связаны с природными процессами [5]. К таким явлениям можно отнести накопление ионов NH₄⁺ в придонных водах при дефиците O₂ (табл. 2). Как видно из табл. 2, значитель-

ные аномалии относительных концентраций ионов NH₄⁺ по сравнению со среднерегionalными наблюдались при содержании O₂ < 10% насыщения в придонных слоях (12–13.5 м) в оз. Турастомозеро во все сезоны наблюдений.

Подобное распределение форм N отмечалось и в оз. Падмозеро весной 2001 г. при дефиците O₂ в придонных слоях. Повышенная относительная концентрация NO₃⁻ и сопряженная с ней пониженная концентрация N_{орг} наблюдались в озерах Ванчозеро весной 2001 г. (при 60%-ном насыщении воды O₂) и Турастомозеро в тот же период (при 14%-ном насыщении). На глубине 9 м в оз. Турастомозеро концентрация N_{орг} возрастала приблизительно в 1.5 раза, а непосредственно в придонном слое (на 13.5 м) – в 2 раза относительно поверхностного горизонта, что свидетельствует о поступлении соединений N в воду из ДО в период зимней стагнации. Как видно из табл. 2, на горизонте 9 м, где наблюдается дефицит O₂, происходит накопление NO₃⁻. В придонном же горизонте (на 13.5 м) отмечалось резкое повышение относительной концентраций NH₄⁺, что, вероятно,

Таблица 1. Показатели ионного состав воды системы р. Кенти в летний период 2008 г.

Водный объект	Alk, мг HCO ₃ /л	pH	Σ _и		%–эквивалент (формула Курлова)	Классификация по Алекину
			мг/л	ммоль–экв/л		
Оз. Среднее Куйто (юг)	9.7	6.8	25	0.5	$\frac{\text{Ca } 39 \text{ Mg } 24 \text{ Na } 18 \text{ K } 17}{\text{HCO}_3 \text{ 38 SO}_4 \text{ 34 A}_{\text{орг}} \text{ 22 Cl } 7.3}$	HCO ₃ , SO ₄ , Ca
Р. Кенти (исток)	24.1	7.2	101	1.8	$\frac{\text{K } 38 \text{ Ca } 30 \text{ Mg } 19 \text{ Na } 12}{\text{SO}_4 \text{ 65 HCO}_3 \text{ 30 Cl } 3.7 \text{ NO}_3 \text{ 1.6}}$	SO ₄ , K, Ca
Оз. Кенто	31.1	6.7	143	3.6	$\frac{\text{K } 40 \text{ Ca } 30 \text{ Mg } 20 \text{ Na } 11}{\text{SO}_4 \text{ 71 HCO}_3 \text{ 25 Cl } 2.8}$	SO ₄ , K
Оз. Койвас	36.7	7.3	174	4.4	$\frac{\text{K } 41 \text{ Ca } 30 \text{ Mg } 19 \text{ Na } 9.9}{\text{SO}_4 \text{ 69 HCO}_3 \text{ 25 NO}_3 \text{ 3.3 Cl } 2.3}$	SO ₄ , K
Приток Поппаллярви– Юриккаярви	77.6	7.8	400	10.1	$\frac{\text{K } 45 \text{ Ca } 28 \text{ Mg } 17 \text{ Na } 9.4}{\text{SO}_4 \text{ 72 HCO}_3 \text{ 23 NO}_3 \text{ 3.9 Cl } 1.9}$	SO ₄ , K
Оз. Поппалярви	76.1	7.6	372	9.5	$\frac{\text{K } 41 \text{ Ca } 28 \text{ Mg } 17 \text{ Na } 13}{\text{SO}_4 \text{ 69 HCO}_3 \text{ 24 NO}_3 \text{ 5 Cl } 2}$	SO ₄ , K
Оз. Окуневое–Куроярви	98.5	7.8	467	11.9	$\frac{\text{K } 46 \text{ Ca } 28 \text{ Mg } 17 \text{ Na } 8.8}{\text{SO}_4 \text{ 68 HCO}_3 \text{ 25 NO}_3 \text{ 5 Cl } 2.2}$	SO ₄ , K
оз. Окуневое	107.9	7.9	519	13.1	$\frac{\text{K } 49 \text{ Ca } 27 \text{ Mg } 17 \text{ Na } 7.6}{\text{SO}_4 \text{ 68 HCO}_3 \text{ 25 NO}_3 \text{ 4.8 Cl } 2.2}$	SO ₄ , K
Хвостохранилище	130.2	8.1	672	17.1	$\frac{\text{K } 51 \text{ Ca } 25 \text{ Mg } 15 \text{ Na } 8.6}{\text{SO}_4 \text{ 68 HCO}_3 \text{ 24 NO}_3 \text{ 6.3 Cl } 2.1}$	SO ₄ , K

Таблица 2. Распределение форм азота в оз. Турастомозеро в 2000–2001 гг. (прочерк – отсутствие данных)

Сезон	h*, м	t, °C	O ₂ , %	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{орг}	N _{общ}	Индексы аномалии				
				мг N/л					NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ²⁻	N _{орг}	I
Осень	0.5	19.0	96	0.02	0.001	0.01	0.33	0.36	0	0	0	0	0
	13.0	7.6	8	0.38	0.002	0.48	0.20	1.06	1	0	0	1	1
Весна	0.5	–	100	0.02	0.000	0.07	0.29	0.38	0	0	0	0	0
	9.0	–	16	0.01	0.001	0.40	0.15	0.56	0	0	1	1	1
	12.0	–	9	0.25	0.002	0.33	0.17	0.75	1	0	0	1	1
Лето	0.5	17.0	102	0.03	0.001	0.01	0.30	0.34	0	0	0	0	0
	13.5	8.6	64	0.13	0.002	0.01	0.35	0.49	0.98	0	0	0	0.6

* – горизонт отбора проб воды.

связано с недостатком O₂ (8% насыщения) для дальнейшего его окисления до NO₃⁻. Анализируя данное распределение форм N по глубине, можно предположить, что в период зимней стагнации в этих озерах ОВ, поступившее в летний период в ДО, разлагается с образованием NH₄⁺, который вследствие

диффузии и других обменных процессов переходит в придонные и следующие за ним горизонты, где окисляется до NO₃⁻ в кислородной среде. Похожая ситуация наблюдается в оз. Турастомозео и летом, однако из-за процессов новообразования ОВ и лучшего, чем зимой, перемешивания водных масс и насыщения воды O₂ аномалии в распределении

форм N менее заметны. Повышенная относительная концентрация NH_4^+ отмечалась в этом озере в начале и в конце лета в придонных слоях.

Таким образом, метод поиска аномальных отклонений в распределении форм N позволил выявить природные особенности водных объектов Заонежья, связанные с процессами новообразования и деструкции ОВ в стратифицированных малых водоемах с замедленным водообменом.

Оз. Онежское относится к крупным стратифицированным озерам. Вследствие этого в зоне гипolimниона происходит накопление NO_3^- , недоступного для потребления фитопланктоном, что выявляется повышенным коэффициентом аномальности ионного состава. Однако при обработке данных были выявлены участки озера со значительными аномалиями в содержании NO_3^- и Cl^- . Как видно из рис. 3, аномально повышенное содержание NO_3^- приурочено в основном к районам выпуска сточных вод, а также к южному, юго-западному и восточному побережьям озера, где ведется интенсивная сельскохозяйственная деятельность.

При подробном анализе распространения зоны аномалии от северных губ озера, в сравнении гидрохимическими наблюдениями [9], ясно видно, что она берет свое начало в районе выпуска хозяйственно-бытовых сточных вод г. Петрозаводска и распространяется в виде “языка” в открытую глубоководную часть озера, сливаясь с зоной аномалии, берущей свое начало в Кондопожской губе. В районе озера вблизи устья р. Суны также отмечено аномально высокое содержание Cl^- , связанное, по-видимому, с поступлением подземных вод.

Аномалии форм N отмечались в течение всего периода наблюдений с 1992 по 2008 г. в Кондопожской и Петрозаводской губах, наиболее подверженных антропогенному влиянию, а в ряде случаев — и в центральном плесе. Наибольшие отклонения от среднерегionalного соотношения форм отмечались в Кондопожской губе Онежского оз. в осенний и зимний периоды. Характерно для этого района озера увеличение доли ионов NH_4^+ и NO_3^- на фоне пониженного содержания $\text{N}_{\text{орг}}$ по сравнению с другими районами озера.

Таким образом, на примере исследованных объектов показано, что применение метода функций желательности и расчета на его основе интегрированных индексов аномальности химического состава воды позволяет выполнить автоматизированный поиск объектов с высокими отклонениями от среднерегionalных фоновых величин.

ВЫВОДЫ

Для определения степени отклонения химического состава водных объектов от среднерегionalных

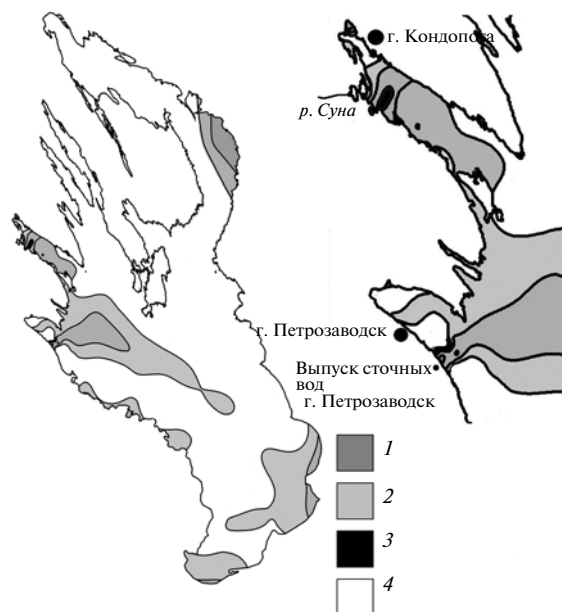


Рис. 3. Карта-схема распределения зон аномалий ионного состава воды Онежского оз. 1, 2 — NO_3^- высокие (3–4%-экв.) и средние (2,5–3,0%-экв.), 3 — Cl^- (25%-экв.), 4 — ионы отсутствуют ($\text{NO}_3^- < 2,5$, $\text{Cl}^- < 10\%$ -экв.).

ных величин были получены уравнения для функций желательности. В полученные для них уравнения введены коэффициенты, позволяющие гибко масштабировать шкалы этих функций при переходе от одного химического параметра к другому. Предложен интегральный индекс аномальности химического состава воды. Достоинство предложенного метода заключается в простоте его алгоритмизации и возможности применения при автоматизированном анализе состояния водных объектов.

Применение разработанных методов проиллюстрировано на водных объектах Республики Карелии. При этом удалось установить, что система р. Кенти находится в антропогенно измененном состоянии и что ионный состав воды резко отличается от среднерегionalного. Наиболее характерные ЗВ — K^+ , SO_4^{2-} и NO_3^- , причем эквивалентная доля последних уменьшается гораздо быстрее, чем K^+ и SO_4^{2-} , что связано с потреблением NO_3^- в процессе новообразования ОВ. Удалось установить, что сбросы техногенных вод отражаются на химическом составе воды оз. Среднее Куйто.

Для водных объектов Заонежья выявленные природные аномалии в распределении форм N связаны с процессами новообразования и деструкции ОВ в малых стратифицированных озерах с замедленным водообменом.

В Онежском оз. обнаружена зона аномалий, связанная с выпуском хозяйственно-бытовых сточных

вод г. Петрозаводска. Данная зона не выделяется при использовании других методов анализа вследствие интенсивного водообмена между Петрозаводской губой и открытой частью озера.

Предложенный метод поиска аномальных отклонений в ионном составе воды и соотношении форм N с помощью функций желательности позволяет оперативно выявлять водные объекты со специфическими условиями формирования химического состава воды, в том числе и подверженные антропогенному влиянию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.
2. Зобков М.Б. Автоматизированная система обработки и анализа гидрохимической информации // Матер. науч.-практ. конф. "Современные фундаментальные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод России. Ростов-на-Дону, 2009. С. 190–195.
3. Лозовик П.А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию. Автореф. дис. ... докт. хим. наук. М.: ГЕОХИ РАН, 2006. 56 с.
4. Лозовик П.А. Водоемы района Костомукши. Озерно-речная система Кенти. Общая характеристика // Со-

стояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 99–100.

5. Лозовик П.А., Басов М.И., Зобков М.Б. Поверхностные воды Заонежского полуострова. Химический состав воды // Экологические проблемы освоения месторождения Средняя Падма. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С. 35–47.
6. Лозовик П.А., Бородулина Г.С. Соединения азота в поверхностных и подземных водах Карелии // Вод. ресурсы. 2009. Т. 36. № 6. С. 694–704.
7. Сабылина А.В. Онежское озеро. Химический состав воды // Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992–1997 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. С. 40–52.
8. Сабылина А.В., Дубровина Л.В. Онежское озеро. Общая характеристика // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 7–19.
9. Сабылина А.В., Лозовик П.А., Зобков М.Б. Химический состав воды Онежского озера и его притоков как индикатор экологического состояния // Вод. ресурсы. 2010. Т. 37. № 6. С. 717–729.
10. Zobkov M. Automatic water objects classification and natural water quality assessment // Proc. 7th Intern. Scientific and Practical Conference "Environment. Technology. Resources". Rezekne, 2009. P. 56–63.