

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ГУМИДНОЙ ЗОНЫ НА ОСНОВЕ ИХ КИСЛОТНО-ОСНОВНОГО РАВНОВЕСИЯ

© 2013 г. П. А. Лозовик

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

185003 Петрозаводск, просп. А. Невского, 50

E-mail: lozovik@nwpi.krc.karelia.ru

Поступила в редакцию 24.03.2011 г.

Разработана классификация поверхностных вод гумидной зоны по гумусности, щелочности и трофности, основанная на кислотно-основном равновесии этих вод, обусловленном двумя системами: гумусовой и карбонатной, что позволило более объективно по сравнению с экспертными системами установить геохимические классы вод. Дана интегрированная оценка качества природной воды с использованием баллов качества по отдельным показателям. Для водных объектов, подверженных антропогенному влиянию, указывается степень их загрязнения в соответствии с индексом загрязнения воды, который рассчитывается по важнейшим нормируемым компонентам с учетом их геохимического фона и значений ПДК для рыбохозяйственных водоемов.

Ключевые слова: поверхностные воды, гумидная зона, классификация вод, кислотно-основное равновесие.

DOI: 10.7868/S0321059613060072

Качество природных вод – основная характеристика степени их пригодности для различных видов водопользования. В этом плане существенную помощь могла бы оказать классификация вод, основанная на каком-либо общем свойстве природных вод, связывающем воедино многообразие химических параметров воды. Разработка теоретических основ классификации вод является весьма актуальной задачей.

В настоящее время широко используются классификации вод по преобладающим ионам (для поверхностных вод чаще всего применяется классификация О.А. Алекина) и по уровню трофии (содержанию общего фосфора ($P_{\text{общ}}$) и хлорофилла “а” (Хл “а”). По остальным параметрам очень мало классификаций для природных вод и достаточно много – для загрязненных. Вопросы загрязнения вод в данной работе не рассматриваются, а основное внимание уделено классификации природных вод. Применительно к поверхностным водам гумидной зоны необходимо выделить экспертные классификации вод по минерализации, косвенным показателям содержания органического вещества (ОВ) и уровню трофии (по $P_{\text{общ}}$ и Хл “а”) отечественных исследователей И.В. Баранова [1], Н.С. Харкевич [23], С.П. Кита-

ева [5], В.В. Бульона [3]. Следует также отметить комплексную экологическую классификацию качества вод В.Н. Жукинского, О.М. Оксьюка [18], но она достаточно громоздкая, и выделяемые по ней классы вод зачастую не соответствуют действительности. Автор настоящей статьи в сотрудничестве со своими коллегами также неоднократно делал попытку создания классификации водных объектов Карелии с чисто экспертным подходом, но всякий раз возникали сложности отнесения объектов к тому или иному типу в переходных областях и несоответствие другим экспертным классификациям [14, 15].

В гидрохимии традиционно принято рассматривать гидрохимический режим водного объекта по четырем составляющим: 1) минерализации и ионному составу; 2) органическому веществу; 3) биогенным и литофильным элементам; 4) газовому составу, взвешенным веществам и рН воды. Поэтому в классификации вод эти четыре составляющие необходимо рассматривать как отражающие основные характеристики воды, но при этом следует учесть взаимосвязь и взаимообусловленность многих компонентов химического состава воды и на этой основе создать классификации вод по химическим показателям.

ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ГУМИДНОЙ ЗОНЫ

Поверхностные воды гумидной зоны отличаются высокой вариабельностью химического состава воды. Яркий пример этих вод – поверхностные воды Карелии. Анализируя данные по химическому составу воды более чем 800 водных объектов Карелии, можно отметить некоторые особенности вод гумидной зоны [8]. Так, минерализация в поверхностных водах изменяется в широких пределах (2–460 мг/л, среднее медианное значение – 19 мг/л). Среди катионов преобладают ионы Ca^{2+} , Mg^{2+} и редко Na^+ . В составе анионов наряду с гидрокарбонатами зачастую высока доля анионов органических кислот, а в низкощелочностных высокогумусных водах они доминируют. Между макрокомпонентами и минерализацией воды ($\Sigma_{\text{и}}$) существует тесная связь. Особенно высокая степень корреляции r наблюдается между $\Sigma_{\text{и}}$ и щелочностью воды (Alk), содержанием Ca^{2+} , Mg^{2+} , поскольку поступление в воду этих компонентов связано в первую очередь с процессами выщелачивания глинистых силикатных и карбонатных пород под действием CO_2 и гумусовых веществ: $\Sigma_{\text{и}} = 1.5 [\text{Alk}] + 6.2$, $r = 0.98$, $n = 605$; $\Sigma_{\text{и}} = 6.0[\text{Ca}^{2+}] + 4.4$, $r = 0.97$, $n = 605$; $\Sigma_{\text{и}} = 14.7[\text{Mg}^{2+}] + 3.6$, $r = 0.96$, $n = 605$, где n – количество водных объектов (во всех уравнениях концентрация выражена в мг/л).

Вторая особенность вод – высокая вариабельность содержания ОВ – от весьма низкого (~1 мг/л) до очень высокого (≥ 90 мг/л). При этом в большинстве объектов доминируют вещества гумусовой природы, которые дают небольшой вклад в щелочность воды [9]. В то же время в озерах с замедленным водообменном (озера или с малым удельным водосбором, или высокоэвтрофные) доля автохтонного ОВ может достигать 40–60% [12]. В высокогумусных водах наблюдается значительное содержание Fe (до 5 мг/л), тогда как в низкогумусных – небольшое количество (< 0.01 –0.3 мг/л). Между содержанием Fe и гумусностью (Num) воды существует определенная связь: $\text{Fe}_{\text{общ}} = 0.0143 \text{ Num} + 0.08$, $r = 0.63$, $n = 756$, где $\text{Num} = \sqrt{\text{ЦВ} \cdot \text{ПО}}$ (ЦВ – значение цветности воды, град. шкалы Со; ПО – перманганатная окисляемость, мгО/л). Гумусовые вещества являются хорошими комплексообразователями по отношению к ионам многих металлов, в том числе и Fe [4]. Это и обуславливает высокое содержание Fe в гумусных водах. Поскольку растворимость фосфатов Fe невысока, это приводит к тому, что $\text{P}_{\text{общ}}$ представлен в основном Fe-связанными форма-

ми при низком содержании гидро- и дигидрофосфатов. Концентрация $\text{P}_{\text{общ}}$ в поверхностных водах Карелии колеблется в широких пределах (2–204 мкг Р/л), но медианная концентрация достаточно низкая (17 мкг Р/л). Содержание $\text{P}_{\text{мин}}$ составляет в среднем ~10% $\text{P}_{\text{общ}}$.

В связи с тем, что все объекты, за исключением больших стратифицированных озер [10], имеют близкую картину распределения форм азота, нет необходимости учитывать их содержание при классификации вод по уровню трофии. Более важно учитывать содержание $\text{P}_{\text{общ}}$, поскольку основное лимитирование связано с фосфором, а не с азотом.

Для поверхностных вод гумидной зоны характерна большая изменчивость рН: от типично кислых растворов (рН < 4.0) до слабощелочных и даже щелочных (рН > 9.0) (рис. 1в). Щелочные воды, конечно, наблюдаются редко и обычно – при интенсивном цветении воды.

Между рН и Alk воды отмечается весьма тесная связь (рис. 1а):

$$\text{pH} = 0.96 \lg [\text{Alk}] + 7.48, r = 0.87, n = 745 \text{ ([Alk] – в ммоль-экв/л)}. \quad (1)$$

Содержание CO_2 в поверхностных водах Карелии варьирует в очень широких пределах: от почти полного отсутствия до значений, превышающих 30 мг/л. В большинстве объектов его концентрация изменяется в пределах 3–9 мг/л (рис. 1б).

Анализ кривых распределения содержания всех макрокомпонентов в поверхностных водах Карелии показал, что для большинства из них распределение близко к логнормальному, а для содержания Si и значений рН воды – к нормальному [15]. Поэтому при классификации вод по химическим показателям необходимо учитывать это обстоятельство и для большинства компонентов следует использовать принцип геометрической, а для содержания Si и значений рН – арифметической прогрессии. Понятно, что классификация вод не должна базироваться на большом количестве параметров, чтобы не быть громоздкой, в то же время выбор параметров должен быть таким, чтобы они в полной мере характеризовали качество воды. С учетом особенностей состава поверхностных вод гумидной зоны, а также взаимосвязи и взаимообусловленности многих химических показателей для классификации вод достаточно ограничиться Alk и рН воды, содержанием ОВ и Fe, а для характеристики трофического статуса водных объектов – концентрацией $\text{P}_{\text{общ}}$, ис-

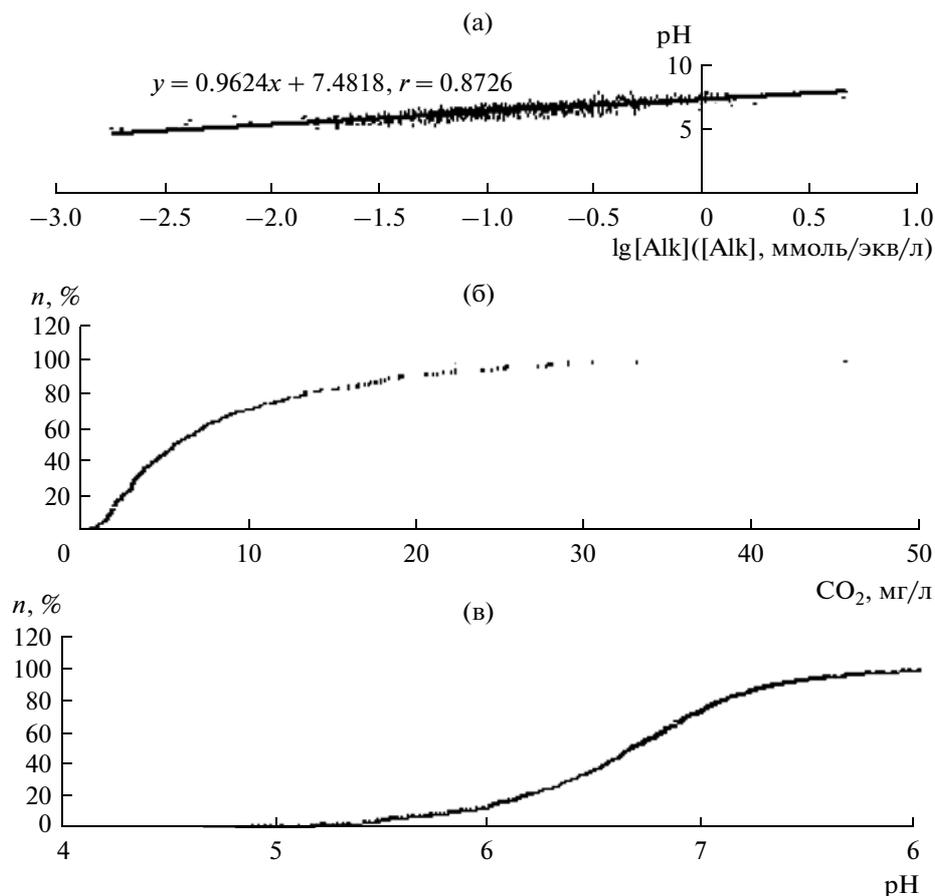


Рис. 1. Зависимость pH воды от $\lg[\text{Alk}]$ (а), распределение содержания CO_2 (б) и величины pH (в) в водных объектах Карелии по накопленным частотам.

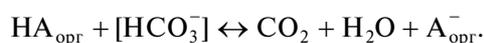
пользуемой для этих целей многими исследователями.

Необходимо отметить, что на сегодня наиболее широко используются косвенные показатели содержания ОВ (ЦВ, ПО, химическое и биохимическое потребление кислорода (ХПК, БПК соответственно) и содержание органического углерода ($\text{C}_{\text{орг}}$)). Хорошо известно, что ЦВ обусловлена, в основном, наличием гумусовых веществ, которые легко окисляются перманганатом. Поэтому было предложено использовать новый показатель – гумусность воды (Hum), выражающий в условных единицах содержание гумусовых веществ, как среднегеометрическое значение ЦВ и ПО [12].

Наконец, важно найти принцип классификации: каким образом связать воедино многообразие химических показателей воды. Основу для классификации вод гумидной зоны может составить кислотно-основное равновесие в этих водах.

КИСЛОТНО-ОСНОВНОЕ РАВНОВЕСИЕ КАК ОСНОВА КЛАССИФИКАЦИИ ВОД

Кислотно-основное равновесие в поверхностных водах гумидной зоны обусловлено карбонатной и гумусной системами [11]. В таких водах pH определяется содержанием их равновесных компонентов. Поскольку гумусовые кислоты более сильные, чем угольная кислота, то при наличии их в воде устанавливается равновесие типа



Константа равновесия – это соотношение констант диссоциации кислот гумусовых и угольной:

$$K = \frac{[\text{CO}_2][\text{A}_{\text{орг}}^-]}{[\text{HA}_{\text{орг}}][\text{HCO}_3^-]}$$

В таком случае pH можно вычислить по одному из уравнений:

$$\text{pH} = \text{p}K_1 + \lg \frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{CO}_2]}, \quad \text{pH} = \text{p}K_{\text{гум}} + \lg \frac{[\text{A}_{\text{орг}}^-]}{[\text{HA}_{\text{орг}}]}, \quad (2)$$

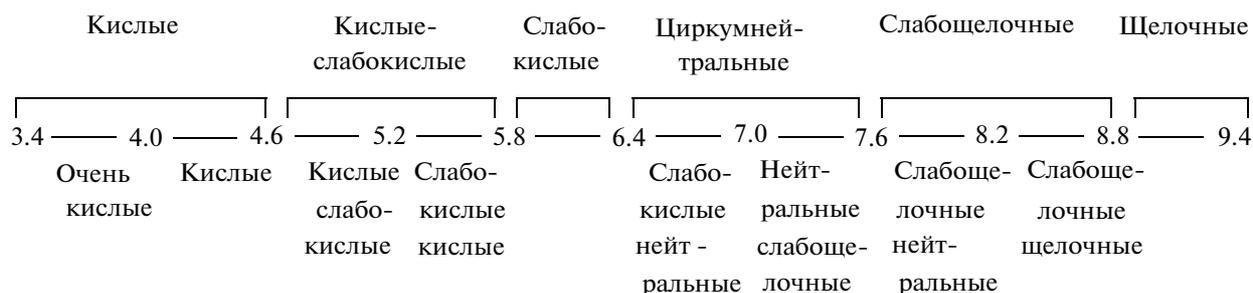


Рис. 2. Ранжирование шкалы рН природных вод.

где pK_1 – показатель диссоциации угольной кислоты по первой ступени ($pK_1 = -\lg K_1$), $K_{гум}$ – средняя константа диссоциации гумусовых кислот.

На основании традиционного анализа природных вод (определение рН, Alk, кислотности – Acid) с учетом ионного баланса воды можно получить следующие данные по содержанию компонентов кислотно-основного равновесия:

$[HA_{орг}] + [CO_2] = m$, $[A_{орг}^-] + [HCO_3^-] = [\Sigma_{кат}] - [\Sigma_{АСК}] = a$, где m – сумма слабых органических кислот ($HA_{орг}$) и CO_2 , a – сумма анионов органических кислот ($A_{орг}^-$) и HCO_3^- , определяемая по ионному балансу воды: разности суммы катионов ($\Sigma_{кат}$) и суммы анионов сильных кислот ($\Sigma_{АСК}$).

Величина рН таких вод может быть выражена формулой

$$pH = pK_1 + \lg \frac{1+n}{n+K} + \lg \frac{a}{m} = p\bar{K} + \lg \frac{a}{m}, \quad (3)$$

где $n = [CO_2]/[HA_{орг}]$, $p\bar{K} = pK_1 + \lg \frac{1+n}{n+K}$. Величина $p\bar{K}$ имеет переменное значение, приближаясь то к pK_1 (угольной кислоты) (6.4), то к $pK_{гум}$ (гумусовых кислот) (4.0) в зависимости от вклада каждой из систем в кислотно-основное равновесие. Удобство формулы (3) заключается в том, что по ней легко вычислить $p\bar{K}$ и сразу установить, какой системой определяется кислотно-основное равновесие: если $p\bar{K} > 5.8$, то, в основном, карбонатной системой, если $p\bar{K} < 4.6$, то – гумусовой. В переходной области при $4.6 < p\bar{K} < 5.2$ доминирует гумусово-карбонатная система, при $5.2 < p\bar{K} < 5.8$ – карбонатно-гумусовая.

На основании вышеуказанных теоретических представлений шкалу рН для природных вод следует ранжировать с шагом 0.6 единиц. Используя исходные реперные значения рН, равные $p\bar{K}$ при $a = m$, можно охватить всю область значений рН,

наблюдаемых в водных объектах гумидной зоны (рис. 2).

В результате удается разделить шкалу рН на четыре крупные области: циркумнейтральных и слабощелочных вод (кислотно-основное равновесие обусловлено карбонатной системой); кислых-слабокислых и кислых вод (гумусовые кислоты вносят основной вклад в кислотность среды); промежуточную между ними – слабокислых вод (переходную от карбонатной к карбонатно-гумусовой системе кислотно-основного равновесия); щелочных вод (относится к системам, у которых отсутствует CO_2 , уже в значительном количестве присутствуют карбонаты при низком содержании гидрокарбонатов).

При изменении рН на 0.6 единиц щелочность воды при одном и том же содержании CO_2 должна измениться в ~4 раза ($10^{0.6} = 3.98$), согласно уравнению (2). Поэтому переход от одного класса щелочности к другому должен соответствовать 4-кратному изменению Alk воды. Теперь рассмотрим, как будет меняться Num при изменении рН на 0.6 единиц для кислых гумусных вод. При одном и том же содержании $HA_{орг}$ концентрация $[A_{орг}^-]$ должна измениться в 4 раза. Примем, что показатель рН воды равен $pK_{гум}$, а Num воды представим как сумму $[HA_{орг}]$ и $[A_{орг}^-]$, тогда $Num_1 = \{[HA_{орг}] + [A_{орг}^-]\} b = 2b[HA_{орг}]$, $Num_2 = \{[HA_{орг}] + 4[A_{орг}^-]\} b = 5b[HA_{орг}]$, $Num_2/Num_1 = 2.5$, где b – некоторый коэффициент перевода одной размерности в другую. т.е. при переходе от одного класса гумусности к другому Num должна измениться в 2.5 раза.

Таким образом, разбивая шкалу рН с шагом 0.6, получаем коэффициенты для ранжирования шкалы Alk и Num воды. Они оказались разными: в первом случае – 4-, а во втором – 2.5-кратное изменение при переходе от одного класса вод к другому.

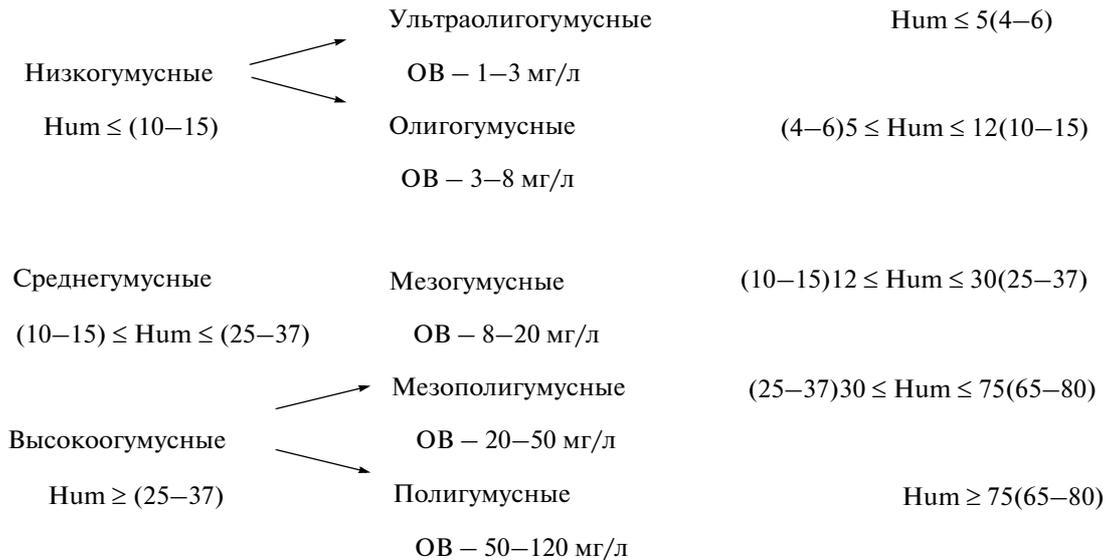


Рис. 3. Шкала Hum поверхностных вод (в скобках указаны нижние и верхние значения Hum относительно пограничного значения).

КЛАССИФИКАЦИЯ ВОД ПО ГУМУСНОСТИ

Предварительный анализ показал, что средняя Hum для поверхностных вод Карелии находится между мезо- и мезополигумусными классами вод, поэтому в качестве реперной точки отсчета для шкалы Hum выберем ее медианное значение ($\text{Hum} = 28, n = 745$), округлив до 30. Относительно этой точки можно провести ранжирование шкалы Hum, но следует предусмотреть, что границы между классами гумусности не могут быть строго фиксированными, должны быть некоторые переходные области. Для того чтобы найти интервалы значений Hum в переходных областях, учтем, что минимальное значение Hum и погрешность определения этого показателя составляет 2 единицы, поэтому примем в качестве интервала между ультраолиго- и олигогумусными водами эту величину Hum. Используя коэффициент (2.5) перехода от одного класса гумусности к другому, получим интервалы значений для всех переходных областей шкалы Hum. Поскольку распределение Hum в поверхностных водах Карелии больше соответствует логнормальному закону, то диапазоны изменения относительно среднего значения не являются симметричными: в нижней области показатель меньше, а в верхней – больше. С учетом вышеизложенного построена шкала Hum (рис. 3).

На шкале приведены также ориентировочные значения содержания ОВ по отдельным классам гумусности. Шкала Hum разделяется на две крупные области вод – низкогумусных и высокогумусных, а также переходную между ними – среднегумусных (мезогумусных). Низкогумусные во-

ды подразделяются на ультраолигогумусные и олигогумусные, а высокогумусные – на мезополигумусные и полигумусные. Указанная выше терминология уже давно и широко применяется на практике многими исследователями. В то же время отечественными основоположниками классификации вод по содержанию ОВ (И.В. Барановым [1], Н.С. Харкевич [23] и С.П. Китаевым [6]) использовано двукратное изменение показателей ЦВ, ПО и ХПК, что соответствует изменению рН на 0.5 единиц в кислых гумусных водах.

Необходимо выяснить, насколько приведенная выше разбивка достоверна, поскольку в качестве точки отсчета было взято медианное значение Hum в поверхностных водах Карелии, а не какое-то другое значение. Для этого рассчитаем максимальную и минимальную Hum по экстремальным показателям ЦВ и ПО поверхностных вод Карелии: $\text{ЦВ}_{\text{макс}} = 460$ град., $\text{ПО}_{\text{макс}} = 82$ мг О/л, $\text{Hum}_{\text{макс}} = 194$, $\text{ЦВ}_{\text{мин}} = 3$ град., $\text{ПО}_{\text{мин}} = 1.7$ мг О/л, $\text{Hum}_{\text{мин}} = 2.3$. Полученные значения минимальной и максимальной Hum соответствуют нижнему и верхнему показателям на шкале Hum.

Дополнительным показателем принадлежности водного объекта к тому или иному классу гумусности служит содержание $\text{Fe}_{\text{общ}}$ (рис. 4). Если показатель Hum воды находится в переходной между классами области, то объект относят к тому классу, которому больше соответствует содержание в нем $\text{Fe}_{\text{общ}}$.

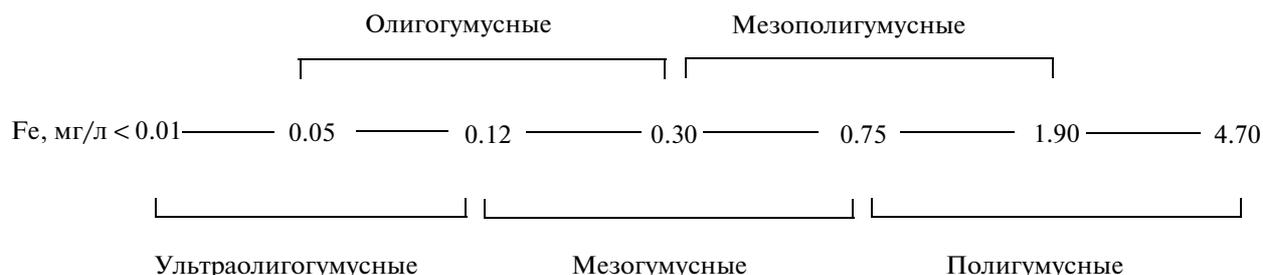


Рис. 4. Распределение содержания Fe в поверхностных водах по классам гумусности.

КЛАССИФИКАЦИЯ ВОД ПО ЩЕЛОЧНОСТИ

Выбор реперной точки для шкалы Alk проведем на основе шкалы рН и уравнения (1) связи рН с Alk воды. В качестве реперного значения рН возьмем 6.4, которое соответствует рК угольной кислоты по первой ступени диссоциации. Тогда по уравнению (1) Alk будет равна 5 мг HCO_3^- /л. Для того чтобы ранжировать шкалу Alk в соответствии со шкалой рН, необходимо также учесть, как и в случае Num, что не может быть строгих границ между классами вод по Alk и рН. Прежде всего надо учитывать то, что в водных объектах с одной и той же Alk может быть разное содержание CO_2 и, как следствие, рН их воды будет различаться. В одном и том же объекте на величине рН будет также сказываться сезонное изменение содержания CO_2 . Так, зимой при низких температурах CO_2 больше, а рН меньше, чем соответствующие показатели в период открытой воды; летом, наоборот, наблюдается наименьшее количество CO_2 в связи с повышенной температурой воды и фотосинтезом, вследствие этого рН выше. Поэтому, если анализировать данные для зимнего периода, то для соответствующих областей Alk величину рН надо брать на 0.2 единицы меньше, а для летнего — на 0.2 больше. При нормальном распределении рН в поверхностных водах Карелии интервалы значений рН относительно среднего значения одинаковы ($\text{рН} \pm 0.2$). Для Alk в качестве минимального интервала значений примем 0.3 мг HCO_3^- /л, что соответствует верхней границе Alk в низкощелочностных кислых слабокислых водах. Аналогичная величина и у погрешности определения этого показателя. Как и в случае Num, при логнормальном распределении Alk в поверхностных водах Карелии интервалы Alk относительно среднего значения несимметричны.

В соответствии с вышесказанным, шкала Alk вод в сопоставлении с рН представлена на рис. 5.

В данном случае получились четыре крупные области Alk и рН: среднещелочностных циркум-

нейтральных и высокощелочностных слабощелочностных вод, а также низкощелочностных кислых-слабокислых и безщелочностных кислых вод. В промежуточной области между щелочностными водами и водами кислого генезиса располагаются слабощелочностные слабокислые воды. В целом при таком ранжировании шкал Alk и рН удается охватить все значения рН и Alk, наблюдаемые в поверхностных водах гумидной зоны.

На шкале Alk показано ориентировочное значение $\Sigma_{\text{и}}$, которое соответствует классам Alk. Слабощелочностные, низкощелочностные и безщелочностные воды характеризуются как ультрапресные ($\Sigma_{\text{и}} \leq 15$ мг/л), среднещелочностные — как маломинерализованные ($15 < \Sigma_{\text{и}} < 120$ мг/л), а высокощелочностные имеют повышенную $\Sigma_{\text{и}}$ (> 120 мг/л).

На шкале рН имеются важные реперные точки: при рН 5.2 считается, что в воде отсутствуют гидрокарбонаты, а при рН 8.2 отсутствует CO_2 и появляются карбонаты. Срединная величина рН безщелочностных вод близка к средней величине рК гумусовых кислот, а верхние значения рН слабощелочностных вод — к рК угольной кислоты по первой ступени диссоциации. Немаловажно и то, что вся область значений рН среднещелочностных вод и большая часть значений рН высокощелочностных отвечает биологическому оптимуму рН (6.5–8.5), а для питьевых целей допускается использовать воды с рН 6.0–9.0.

КЛАССИФИКАЦИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ТРОФНОСТИ

В поверхностных водах гумидной зоны $P_{\text{общ}}$ — основной лимитирующий биогенный элемент, поэтому для классификации вод по трофности следует использовать в первую очередь этот показатель. Учитывая, что в этих водах $P_{\text{общ}}$ связан с Fe, а последний — с гумусовыми веществами, в качестве коэффициента перехода от одного класса трофности к другому следует использовать тот

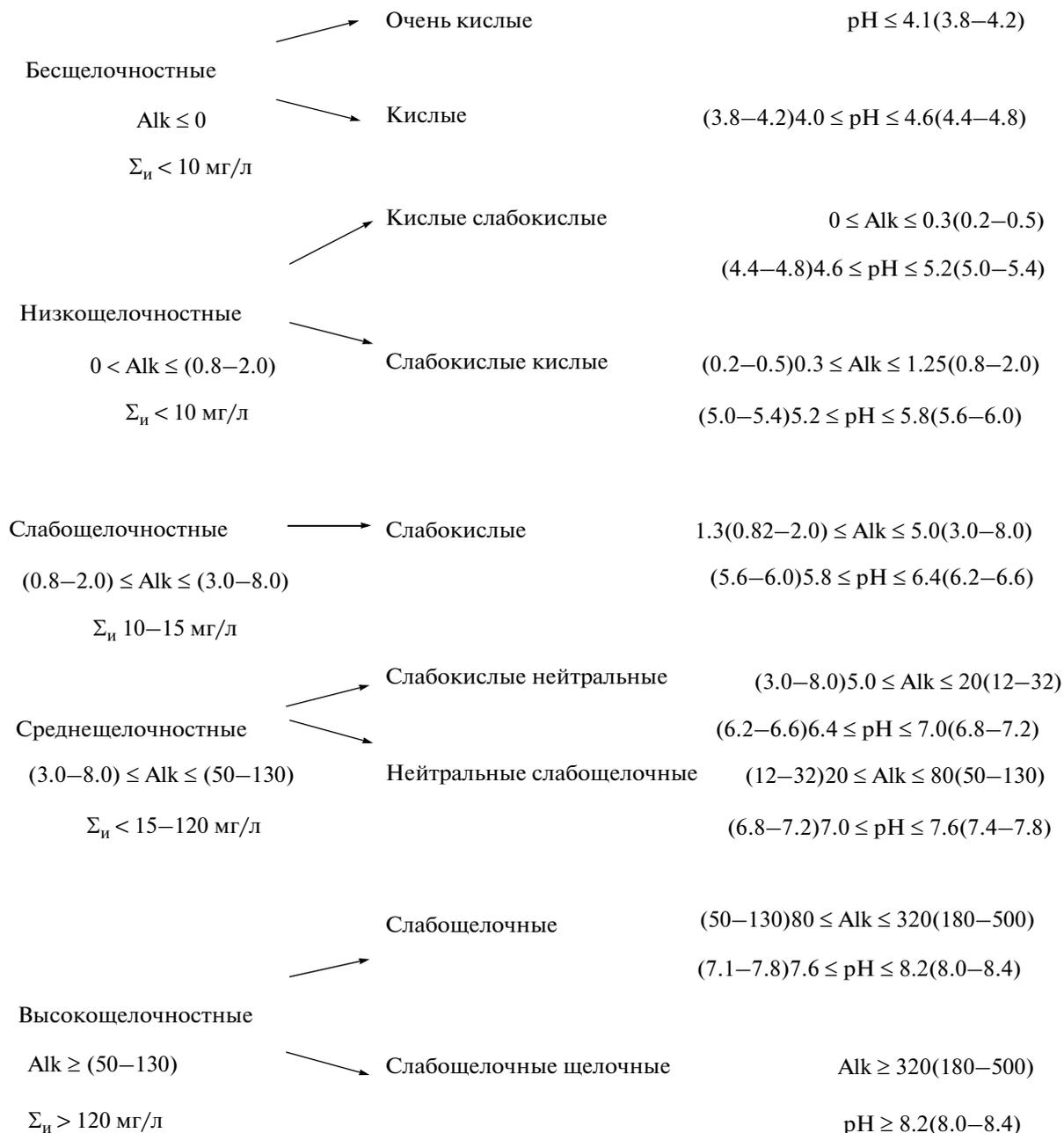


Рис. 5. Распределение водных объектов по классам Alk и pH (в скобках указаны нижние и верхние значения показателей относительно пограничного).

же коэффициент (2.5), что и при классификации вод по гумусности. В качестве реперной точки возьмем значение 10 мкг Р/л, признанное в лимнологии в качестве границы между олиго- и мезотрофными водоемами [24]. В то же время количество продуцированного фитопланктоном вещества в водоемах зависит от величины фотического слоя, который принимается равным двум–трем прозраностям воды [2], которая зависит от ее ЦВ. Поэтому при классификации вод по трофности

должна учитываться Нит воды по принципу: водам с большей Нит соответствует и большее содержание Р_{общ}. Для того чтобы установить классы трофности с учетом Нит воды, воспользуемся данными С.П. Китаева [5] по связи ЦВ и прозрачности воды для более чем 1000 озер северной гумидной зоны (таблица).

В качестве коэффициента изменения концентрации Р_{общ} при переходе от одного класса гумусности к другому будем использовать значение

Зависимость прозрачности воды от цветности (ЦВ) в озерах

ЦВ, град.	Средняя прозрачность, м	Число озер	Соотношение прозрачностей воды смежных классов гумусности
<20	5.3	204	ультраолиго/олиго – 1.7
20–40	3.1	317	олиго/мезо – 1.4
40–80	2.2	325	мезо/мезополи – 1.5
80–160	1.5	187	мезополи/поли – 1.7
>160	0.9	98	среднее значение – 1.6

1.25, рассчитанное как корень квадратный из среднего значения соотношения показателей прозрачности воды смежных классов гумусности (рис. 6).

В итоге удается получить шкалу трофности для различных шкал Num. Достоверность такой градации можно показать на отдельных примерах. В воде Онежского оз. среднее содержание $P_{\text{общ}}$ составляет 9 мкг Р/л, и озеро по гидробиологическим характеристикам сохраняет олиготрофный статус, но приближается к верхней границе олиготрофных водоемов [19]. В мезогумусном Ладожском оз. концентрация $P_{\text{общ}}$ в 1980-е гг. приближалась к 30 мкг Р/л, а озеро – к эвтрофному состоянию [7]. Оз. Исо-Пюхярви – типичное мезополигумусное мезотрофное ($P_{\text{общ}}$ – 21 мкг Р/л), а оз. Крошнозеро – мезогумусное эвтрофное ($P_{\text{общ}}$ – 50 мкг Р/л) [20].

Следует отметить, что в настоящее время в Финляндии за границу олиго- и мезотрофных вод принято значение 12, мезотрофных и эвтрофных – 25 мкг Р/л [25]. С.П. Китаевым используется еще большее значение для последней границы (50 мкг Р/л) [5]. В представленной классификации концентрации $P_{\text{общ}}$, соответствующие

границе между мезотрофными и эвтрофными водными объектами, изменяются от 25 до 50 мкг Р/л в зависимости от их Num.

В целом шкала трофности разделяется на две крупные области: высокотрофных (эвтрофных и высокоэвтрофных), низкотрофных (ультраолиготрофных и олиготрофных) и промежуточную между ними – среднетрофных (мезотрофных) водоемов. Выше верхней границы высокоэвтрофных располагаются гипертрофные водные объекты, но на территории Карелии они не встречаются. Для загрязненных вод такая картина не редкость. В этой связи в качестве примера можно привести р. Волхов, в которой в отдельные периоды 1980-х гг. концентрация $P_{\text{общ}}$ достигала 300 мкг Р/л [21].

В низкощелочностных кислых-слабокислых и тем более в безщелочностных кислых водах развитие гидробионтов детерминировано реакцией среды [17]. Поэтому для низкощелочностных кислых-слабокислых вод состояние трофности следует классифицировать как ацидотрофное, независимо от содержания $P_{\text{общ}}$, а безщелочностных кислых – как дистрофное, как рекомендовано в [1, 23]. В то же время предполагается, что эти воды также следует относить к олиготрофным [5]. Будем отдавать предпочтение терминологии, предложенной в [1, 23], подчеркивая этим особенности вод и по трофическому статусу, на который оказывает влияние кислотность среды.

ИНТЕГРИРОВАННАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОДЫ И НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ КЛАССИФИКАЦИИ ВОД

Первоначально оценка качества воды проводится отдельно для каждого геохимического класса, к которому относится вода. После этого определяется интегрированный балл качества во-



Рис. 6. Распределение $P_{\text{общ}}$ по классам трофности с учетом гумусности воды.

ды водного объекта в целом. Высокому качеству воды с оценкой 5 баллов по отдельным показателям соответствуют следующие классы вод: низкогумусные, среднещелочные, высокощелочные слабощелочные и низкотрофные; хорошему качеству (4 балла) – мезогумусные, слабощелочные, высокощелочные слабощелочные щелочные и мезотрофные; удовлетворительному (3 балла) – мезополигумусные, низкощелочные, эвтрофные и ацидотрофные; низкому качеству (2 балла) – полигумусные, безщелочные, высокоэвтрофные и дистрофные.

На основании классификации вод по отдельным показателям и баллам качества воды по Hum, Alk, трофности устанавливается интегрированный балл качества воды водного объекта как среднегеометрическое значение из трех оценок:

$B = \sqrt[3]{B_{\text{Hum}} B_{\text{Alk}} B_{\text{троф}}}$. На основании полученных баллов дается характеристика качества воды водного объекта в целом: >4.6 – высокое, >3.6–4.6 – хорошее, 3–3.6 – удовлетворительное качество. Если водный объект хотя бы по одному показателю качества имеет 2 балла, то, независимо от других показателей, он характеризуется низким качеством воды.

Когда водный объект подвержен загрязнению, по нему не рассчитывается интегрированный индекс качества, а указывается индекс загрязнения воды (ИЗВ). Для расчета ИЗВ следует использовать только приоритетные химические показатели, выражающие данный вид загрязнения. В отличие от методики Роскомгидромета [16], расчет ИЗВ осуществляется по региональным допустимым концентрациям (РДК), учитывающим как геохимический фон элемента, так и его ПДК для рыбохозяйственных водоемов [13]. Использование РДК позволяет более достоверно оценить загрязнение водных объектов, чем традиционный расчет ИЗВ.

В качестве примера приведем классификацию некоторых водных объектов Карелии, гидрохимические данные по которым заимствованы из работ [21, 22, 24]: Онежское оз. – олигогумусное (Hum – 10, Fe – 0.04 мг/л) среднещелочное нейтральное слабощелочное (Alk – 55.8 мг HCO_3^- /л, pH – 7.3) гидрокарбонатного класса группы Ca ($\Sigma_{\text{и}}$ – 38.6 мг/л) олиготрофное ($P_{\text{общ}}$ – 9 мкг/л), высокого качества. Оз. Койвас – мезогумусное (Hum – 16, Fe – 0.23) среднещелочное нейтральное слабощелочное (Alk – 48.2 мг HCO_3^- /л, pH – 7.3) сульфатного класса группы K, Ca ($\Sigma_{\text{и}}$ – 163 мг/л) мезотрофное ($P_{\text{общ}}$ – 16 мкг/л), загрязненное (ИЗВ_{рег} = 2.9, K^+ – 32 мг/л, SO_4^{2-} – 57 мг/л,

NO_3^- – 1.0 мг N/л, Li – 16 мкг/л, Ni – 0.6 мкг/л). Оз. Салонъярви – мезополигумусное (Hum – 56, Fe – 0.70) низкощелочное слабокислое кислое (Alk – 1.5 мг HCO_3^- /л, pH – 5.6) карбоксилатного класса группы Ca ($\Sigma_{\text{и}}$ – 6.6 мг/л) ацидотрофное ($P_{\text{общ}}$ – 23 мкг/л), удовлетворительного качества. Оз. Чучъярви – олигогумусное (Hum – 7, Fe – 0.12 мг/л) низкощелочное слабокислое кислое (Alk – 0.6 мг HCO_3^- /л, pH – 5.5) ацидотрофное ($P_{\text{общ}}$ – 7 мкг/л), удовлетворительного качества. Классификация водных объектов дополнена классификацией вод по О.А. Алекину. Для оз. Койвас, которое подвержено загрязнению техногенными водами Костомукшского ГОК, наряду с ИЗВ_{рег} приведены и показатели содержания приоритетных загрязняющих веществ.

Приведенная характеристика водных объектов достаточно полно отражает все их особенности и является своего рода их гидрохимическим паспортом, позволяющим оценить не только качество воды, но и пригодность ее для различных видов водопользования.

ВЫВОДЫ

С учетом кислотно-основного равновесия, а также взаимосвязей химических показателей и характера их распределения в поверхностных водах гумидной зоны (на примере Карельского гидрографического района) разработана геохимическая классификация вод по гумусности, щелочности и трофности.

На основании баллов качества, устанавливаемых по отдельным показателям (Hum, Alk и трофности), дается интегрированная оценка качества воды. Если водный объект подвержен загрязнению, то указывается степень его загрязнения по индексу загрязнения воды, рассчитанного с использованием РДК.

В целом разработанная классификация вод позволяет достаточно полно охарактеризовать водный объект и оценить возможные перспективы его использования для различных видов водопотребления. Хотя классификация разработана на примере водных объектов Карелии, она достаточно общая и может быть использована для всех поверхностных вод гумидной зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов И.В. Лимнологические типы озер СССР. Л.: Наука, 1962. 226 с.

2. Бульон В.В. Закономерности первичной продукции в лимнических экосистемах. СПб.: Наука, 1994. 222 с.
3. Бульон В.В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Л.: Наука, 1983. 199 с.
4. Варшал Г.М., Велиханова Т.К., Кащеева И.Я. Геохимическая роль гумусовых кислот в миграции элементов // Гуминовые вещества в биосфере. М.: Наука, 1993. С. 97–117.
5. Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 395 с.
6. Китаев С.П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. Л.: Наука, 1988. 207 с.
7. Ладожское озеро. Прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука, 2002. 327 с.
8. Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию. Автореф. дис. ... докт. хим. наук. М.: ГЕОХИ, 2006. 56 с.
9. Лозовик П.А. Кислотно-основное равновесие поверхностных вод гумидной зоны. Геохимия. 2007. № 10. С. 1139–1144.
10. Лозовик П. А. Оценка вклада анионов органических кислот в щелочность природных гумусных вод // Журн. аналитической химии. 2005. Т. 60. № 11. С. 1126–1130.
11. Лозовик П.А., Бородулина Г.С. Соединения азота в поверхностных и подземных водах Карелии // Вод. ресурсы. 2009. Т. 36. № 6. С. 694–704.
12. Лозовик П.А., Морозов А.К., Зобков М.Б. и др. Аллохтонное и автохтонное органическое вещество в поверхностных водах Карелии // Вод. ресурсы. 2007. Т. 34. № 2. С. 225–237.
13. Лозовик П.А., Платонов А.В. Определение региональных предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ на примере Карельского гидрографического района // Геоэкология. 2005. № 6. С. 527–532.
14. Лозовик П.А., Сабылина А.В., Коваленко В.Н. и др. Гидрохимическая характеристика малых озер Карелии // Антропогенные изменения экосистем малых озер. СПб., 1991. С. 34–37.
15. Лозовик П.А., Шкиперова О.Ф., Зобков М.Б., Платонов А.В. Геохимические особенности поверхностных вод Карелии и их классификация по химическим показателям // Тр. КарНЦ РАН. 2006. Вып. 9. С. 130–143.
16. Методические рекомендации по формализованной комплексной оценке качества поверхностных и морских вод по гидрохимическим показателям № 250–895 от 21.07.1988. СПб.: Гидрометеиздат, 1988.
17. Моисеенко Т.И. Закисление вод: факторы, механизмы и экологические последствия. М.: Наука, 2003. 276 с.
18. Оксийок О.М., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиол. журн. 1993. Т. 30. № 2. С. 213–221.
19. Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. 293 с.
20. Поверхностные воды озерно-речной системы Шуи в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: КарНЦ АН СССР, 1991. 211 с.
21. Расплетина Г.Ф., Мурашева Е.Б., Трегубова Т.М. и др. Гидрохимическая характеристика притоков // Современное состояние экосистемы Ладожского озера. Л.: Наука, 1987. С. 27–41.
22. Харкевич Н.С. Гидрохимия Кончезерской группы озер – уникальных водных объектов Карелии. Петрозаводск: КарНЦ АН СССР, 1991. 126 с.
23. Харкевич Н.С. Типологические различия в гидрохимии озер верхнего и нижнего участков бассейна р. Шуи // Тр. Кар. отд-ния ГОСНИОРХ. 1966. Т. 4. Вып. 2. С. 3–9.
24. Хатчинсон Д. Лимнология. М., 1969. 591 с.
25. Heinonen P., Herve S. The development of a new water quality classification system for Finland // Wat. Sci. Tech. 1994. V. 30. № 10. P. 21–24.