

**ОЦЕНКА ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ pH
В ОЗЕРАХ КАВКАЗА МЕТОДОМ БИОИНДИКАЦИИ
(ДИАТОМОВЫЙ АНАЛИЗ)**

© 2019 г. Л. В. Разумовский^{1,*}, В. Л. Разумовский¹

Институт водных проблем РАН

¹Москва 119991 Россия, ул. Губкина, 3

*E-mail: l.razumovskiy1960@mail.ru

Поступила в редакцию 17.02.2016 г.

После доработки 01.09.2016 г.

Принята к публикации 29.12.2016 г.

Проведен анализ процессов возможного долговременного изменения pH озер Кавказа. С этой целью были исследованы озерные осадки из пяти малых озер Западного и Центрального Кавказа. Основой исследований стали диатомовые комплексы, изученные из колонок донных отложений. Для реконструкции численных значений pH был применен авторский принцип унификации гидрологических параметров. Используются результаты изотопного датирования. Для исследованных озер построены ряды численных значений pH длительностью от 2000 до 130 лет. Реконструированные ряды численных значений pH свидетельствуют об отсутствии заметных изменений в озерах Западного Кавказа и о выраженных процессах защелачивания в озерах Центрального Кавказа.

Ключевые слова: горные озера, донные отложения, диатомовый анализ.

DOI: 10.31857/S0321-059646151-57

ВВЕДЕНИЕ

Одна из наиболее значимых и востребованных геоэкологических проблем второй половины XX в. — антропогенное закисление озер. Однако со временем на первый план вышла иная проблема, связанная с глобальным потеплением.

Переключение общественного внимания на предполагаемое глобальное потепление позволило научному сообществу более взвешенно обсудить проблему антропогенного закисления. В результате дальнейших исследований стало очевидным, что данная проблематика должна обсуждаться на региональном уровне. Это обусловлено тем, что доли воздействия природных и антропогенных факторов для каждого региона разительно отличаются. Соответственно, и выводы о темпах и наличии антропогенного закисления озер для каждого региона могут заметно различаться. Именно с этой целью были проведены исследования малых озер Кавказа и выделено 5 озер, наиболее пригодных для оценки возможных процессов закисления природных территорий в этом регионе.

Озера — традиционные объекты для экологических и гидрологических реконструкций. Это

связано с тем, что озерные осадки могут дать комплексную информацию о климатических и гидрологических изменениях, происходивших в регионе за длительный промежуток времени. Малые озера, имеющие площадь водного зеркала <1 км², обладают рядом дополнительных преимуществ при палеореконструкциях. Для многих озер малого размера характерна простота очертаний береговой линии, отсутствие сложного рельефа дна, слабопроточный или бессточный гидрологический режим, что определяет непрерывность процессов накопления донных отложений (ДО). Все обследованные озера — Каракель, Донгузорун, Большое, Зеркальное и Кардывач — в той или иной степени отвечают этим требованиям.

При оценке трансформаций, происходящих в озерных экосистемах во времени и пространстве, широко используется метод диатомового анализа. Диатомовые водоросли (класс Bacillariophyceae, отдел Ochrophyta) — широко распространенная группа водорослей, которая хорошо сохраняется в озерных осадках благодаря наличию кремнеземного панциря. Наличие широкого спектра видов-индикаторов по приуроченности к тем или иным значениям pH

позволило на основе авторского принципа унификации биоиндикационных методов достоверно реконструировать долговременные тенденции изменения этого параметра для равнинных озер Европейской части России [6–8, 13, 14]. Этот методологический подход избран при оценке возможных процессов закисления природных территорий в районах расположения горных озер Кавказа.

Анализу колонок ДО из пяти выбранных для изучения озер предшествовало предварительное обследование более 20 озер, расположенных в Приэльбрусье и Краснодарском крае. Полученные данные позволили сделать вывод о достаточно разнообразных гидрологических режимах обследованных озер и значительной вариативности гидрохимических параметров озерных вод [9, 12]. В свою очередь, это определяется высокой пространственной изменчивостью ландшафтно-климатических характеристик и рельефообразующих факторов на территории Западного и Центрального Кавказа.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Большое озеро входит в группу Хмелевских озер (43°43.03' с.ш., 40°11.98' в.д.), расположенных на территории Сочинского государственного природного национального парка. Хмелевские озера имеют тектоническое происхождение. Их образованию способствовало наличие обращенного рельефа: синклинальный прогиб в процессе разрушения стал широким гребнем хребта, а его вогнутая форма способствовала образованию отрицательных форм рельефа — будущих озерных котловин. Озеро Большое — самое крупное в группе Хмелевских озер. Его площадь составляет 9390 м², длина — 194 м, максимальная ширина — 82 м, максимальная глубина — 2 м. Озеро лежит в овальной котловине, вытянутой с северо-запада на юго-восток, с наибольшим расширением в юго-восточной части. Озеро бессточное. Обрамляющие его территории покрыты буковым лесом с небольшой примесью клена. Урез зеркала воды — на высоте 1752.2 м над у. м.

Питание озера осуществляется за счет атмосферных осадков, талых вод и, в меньшей степени, грунтовых вод. Вода озера имеет слабокислую реакцию (рН 5.0–6.4) и отличается слабой минерализацией (≤20 мг/л). Зимой озеро промерзает полностью, до дна. На озере развита водно-болотная растительность, состоящая из осок и мха (озеро заросло на 60–70%). На дне

озера сформировался толстый слой отмершей водно-болотной растительности.

Зеркальное озеро (43°43.38'74" с.ш., 40°10.23'17" в.д.) расположено на территории Сочинского государственного природного национального парка, в 7 км от п. Красная Поляна. Это высокогорное озеро (1888 м над у. м.) можно отнести к категории сверхмалых (<0.01 км²). Ширина озера 57 м, длина 60 м, максимальная измеренная глубина 2.3 м. Акватория озера имеет правильную, близкую к округлым очертаниям форму. Озеро бессточное и расположено на открытом пространстве. Ни один ручей не вытекает из озера и не впадает в него. Процессов заиления дна и зарастания акватории не наблюдается. Питание озера смешанное, снего-дождевое. В силу мелководности озера температурная стратификация отсутствует. Зимой озеро промерзает до дна.

Озеро Кардывач (43°34'21" с.ш., 40°37'43" в.д.) расположено в Краснодарском крае на территории Кавказского государственного природного биосферного заповедника. Это проточное высокогорное озеро (1838 м над у.м.). Из юго-западной части озера берет начало р. Мзымта, а с севера в него впадает р. Верхняя Мзымта. Ширина озера 360 м, длина 500 м, максимальная глубина 17 м. По площади акватории оз. Кардывач относится к категории малых озер (0.133 км²). Котловина озера имеет корытообразную форму. Происхождение озера — моренно-запрудное. Озеро характеризуется дифференцированными, местами изрезанными очертаниями берегов. Оно имеет неправильную форму и состоит из основной акватории и нескольких плесов. Вдоль берегов озера растет пихтово-березовый лес.

Озеро Каракель (43°26'13" с.ш., 41°44'36" в.д.) расположено в пределах западной высокогорной провинции Большого Кавказа, в долине р. Теберда. Озеро находится на высоте 1335 м над у.м., имеет овальную форму и вытянуто в направлении простирающейся долины. Длина озера 280 м, ширина 140 м, основные глубины — 6–11 м. Озеро бессточное, но часть воды, вероятно, фильтруется сквозь рыхлую толщу подстилающей его морены. Со склона, особенно весной, в озеро стекают ручьи и сходят небольшие сели. Основное питание озера осуществляется за счет атмосферных осадков и снеготаяния, расход — путем испарения и фильтрации. Каракель образовалось путем подпруживания ледниковых потоков моренной грядой [18]. По берегам озера произрастают преимущественно сосновые леса.

Возраст наиболее старых сосен, растущих на морене, обрамляющей озеро, — 180–200 лет [17].

Озеро Донгузорун (43°13'48" с.ш., 42°29'63" в.д.) расположено в верховьях долины р. Баксан (Центральный Кавказ) на высоте 3100 м над у.м. Озеро имеет неправильные, вытянутые вдоль долины очертания. Длина озера 650 м, ширина 220 м, максимальная глубина 14 м. Озеро проточное, из него вытекает р. Донгуз-Орун — правый приток р. Баксан. Озеро образовалось путем подпруживания одноименным ледником, который располагается на северном склоне Большого Кавказского хребта. Питание озера преимущественно ледниковое. Озеро расположено на открытой незалесенной территории.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Во всех пяти вышеописанных озерах с 2006 по 2012 г. были отобраны колонки ДО в центральной части их акваторий с максимальных глубин.

В озерах Каракель и Донгузорун колонки ДО отбирались с плота при помощи озерного бура типа “бур Несье” [22]. В озерах Кардывач, Большое и Зеркальное пробы отбирались с лодки стратометром ударно-замыкающего типа (микробентометр С-1).

Диатомовый анализ проводился для образцов из верхних участков колонок, пробуренных и поднятых из озер Каракель и Донгузорун. В колонках из оз. Каракель пробы отбирались через 1 см в интервале 0–48 см; в колонке из оз. Донгузорун — через 0.5 см в интервале 0–25 см. Структуру и объем первичного материала из остальных озер составили колонки ДО следующей высотой: 40 см (оз. Большое), 35 см (оз. Зеркальное), 18 см (оз. Кардывач). Колонки ДО были разрезаны с интервалом 1 см. Верхняя часть колонки ДО из оз. Большого (0–8.0 см) из-за сильной обводненности ДО была разрезана с интервалом 2 см.

Отбор образцов, обработка проб, изготовление постоянных препаратов, подсчет и идентификация створок диатомей проводились по стандартным методикам [3, 10, 23]. Диатомовые комплексы из пяти озер были изучены в 186 образцах из колонок ДО.

Помимо классических форм диатомового анализа, для расчета численных значений рН был применен принцип унификации биоиндикационных методов [7].

Принцип унификации состоит в следующем: в качестве образца реконструкции численных

значений рН взята методика расчета индекса сапробности (S) по Сладечку [24].

$$S = \frac{\sum s_i \times k}{\sum k},$$

где s_i — индивидуальное численное значение сапробности для каждого таксона-индикатора, k — коэффициент относительного обилия каждого таксона-индикатора, рассчитанный по шести-ступенчатой шкале [16].

Соответственно, при расчете рН применен аналогичный метод, что и при расчете численных значений S :

$$pH = \frac{\sum ph_i \times k}{\sum k},$$

ph_i — индивидуальные численные значения для каждого таксона-индикатора рН.

При наличии данных, представленных для данного таксона в виде численного интервала, рассчитывается его среднее значение:

$$ph_i = \frac{(ph_{\min} + ph_{\max})}{2}.$$

Исходной информационной базой данных для расчета численных значений рН послужила работа [1].

Следует особо подчеркнуть, что основной положительной стороной авторской методики является достоверная реконструкция темпов и направленности изменения рН, а не расчет численных значений рН как таковых.

Возраст ДО определен методом изотопного датирования (^{137}Cs , ^{210}Pb) в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН по стандартным методикам [19, 20] и на базе Института минералогии им. В.С. Соболева СОРАН [4, 5]. Общий возраст колонки ДО из оз. Каракель определен методом радиоуглеродного AMS-датирования (радиоуглеродная лаборатория в г. Познань, Польша) [21].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В образцах ДО из оз. Большого идентифицировано 58 таксонов-индикаторов рН, которые подразделяются на следующие группы: ацидофилы (30 таксонов), ацидобионты (1 таксон), алкалифилы (7 таксонов), алкалибионты (2 таксона) и индифференты (18 таксонов).

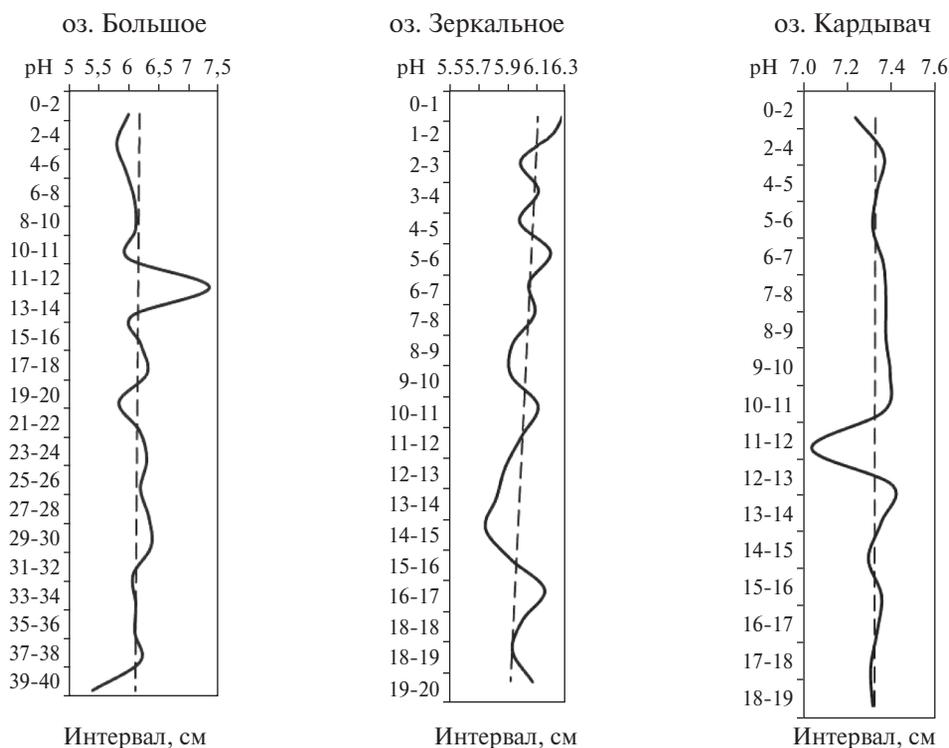


Рис. 1. Долговременные изменения рН в трех озерах Западного Кавказа.

Реконструкция численных значений рН и построенный тренд этого показателя позволяют сделать заключение, что катионно-анионный баланс в озере за анализируемый промежуток времени заметно не менялся (6.05–6.135) (рис. 1). Возраст исследованных озерных отложений в интервале 39–40 см составляет ~150 лет.

В образцах ДО из оз. Зеркального идентифицировано 56 таксонов-индикаторов рН: 27 индифферентов, 13 ацидофилов и ацидобионтов, 16 алкалофилов и алкалобионтов. Линия тренда, построенная по рассчитанным значениям рН, указывает на незначительное смещение катионно-анионного баланса в сторону защелачивания (от 5.9 до 6.1) (рис. 1). Возраст исследованных ДО — 150–180 лет.

В образцах ДО из оз. Кардывач идентифицировано 173 таксона-индикатора рН, которые подразделяются на четыре группы: ацидофилы (25 таксонов), алкалофилы (61 таксон), алкалобионты (17 таксонов) и индифференты (70 таксонов).

Расчитанные численные значения рН свидетельствуют о высоком уровне стабильности оз. Кардывач как единой экосистемы. Большая часть рассчитанных значений рН меняется в очень незначительном интервале (7.38–7.22). Исключение составляет значение рН, расчи-

танное для интервала 11–12 см (7.02). Однако это отклонение от остальных значений относительно невелико и не меняет общей картины стабильного катионно-анионного баланса в озере (рис. 1). Возраст исследованных озерных отложений в интервале 15–16 см составляет ~120 лет.

В образцах ДО из оз. Каракель идентифицировано 20 таксонов-индикаторов рН: 14 алкалофилов и алкалобионтов, 6 индифферентов; ацидофилов и ацидобионтов не обнаружено.

Установлено явное смещение рН: от кислой реакции (5.0–5.5) в эпоху постоянных селевых сходов к нейтральной или слабощелочной (7.0–7.5) во время окончательного прекращения селевого воздействия и начала поступления поверхностных вод только в виде плоскостного смыва с обрамляющих территорий (рис. 2) [11, 15].

Следует отметить, что процессы усиления сульфатного компонента в пресных водах характерны в этом регионе для разных типов водоемов (особенно для озер) и связаны с повышением растворения гипса и ангидрита в нижнем поясе гор [2]. Возраст исследованных озерных отложений ~2000 лет.

В образцах ДО из оз. Донгузорун по рН-приуроченности идентифицировано 65 таксонов-индикаторов: 19 индифферентов, 11 аци-

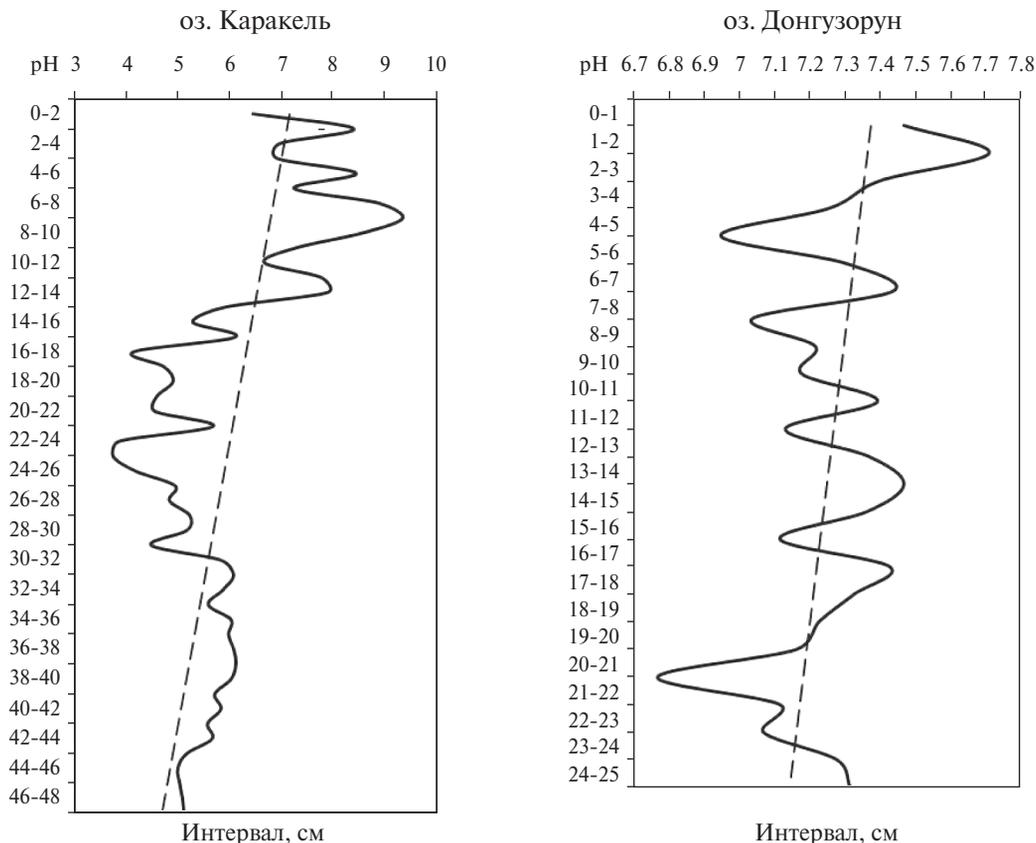


Рис. 2. Долговременные изменения pH в двух озерах Центрального Кавказа.

дофилов и ацидобионтов, 35 алкалофилов и алкалобионтов. Такое соотношение таксонов-индикаторов, приуроченных к кислой и щелочной среде, указывает (на основе проведенных расчетов) на заметное смещение pH в сторону защелачивания (рис. 2).

Линия тренда, построенная по рассчитанным значениям pH, также указывает на некоторое смещение катионно-анионного баланса в сторону защелачивания (от 7.15 к 7.37), что, вероятно, связано с составом местных горных пород. Возраст исследованных озерных отложений ~130 лет.

Анализ причин изменения pH в исследованных озерах позволяет утверждать, что стабильность этого показателя зависит в первую очередь от состава пород обрамляющих гор и гидродинамического режима (проточное озеро или непроточное). Озера Большое и Зеркальное бессточные, склоны гор непосредственно не примыкают к акватории озер. Именно в этих озерах показатель pH наиболее стабилен и фактически не менялся.

Озеро Кардывач проточное и обрамлено склонами гор. Активное поступление обломочного материала в результате поверхностного смыва, а также с водами р. Верхняя Мзымта привело к незначительному смещению значений pH и слабому защелачиванию озерных вод.

Озера Каракель и Донгузорун расположены в районе Центрального Кавказа, где состав горных пород иной, нежели на южном склоне Главного Кавказского хребта, где расположено оз. Кордывач. Иной состав горных пород исходно подразумевает более активное смещение показателя pH в сторону защелачивания озерных и речных вод.

Озеро Каракель бессточное, и процесс защелачивания вод в последние годы замедлился из-за строительства дороги вдоль склонов примыкающих гор. Это привело к ослаблению процессов поступления обломочного материала на его акваторию. Однако в целом процесс долговременного защелачивания вод озера достаточно выражен.

Озеро Донгузорун проточное, а поступление обломочного материала, помимо вышеописанных

источников его транспортировки, дополняется деятельностью примыкающего ледника. Отмечены выраженные процессы защелачивания.

Процессы закисления, в том числе антропогенного генезиса, в регионе не выявлены.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования демонстрируют высокую информативность и достоверность авторского метода расчета численных значений рН для долговременных реконструкций.

Ни в одном из исследованных озер не выявлено тенденций к закислению вод.

Для озер, расположенных в районе Западного Кавказа, характерно отсутствие заметных изменений рН.

Для озер, исследованных в районе Центрального Кавказа, отмечены долговременные процессы защелачивания озерных вод.

Выводы об отсутствии процессов закисления на территории Кавказа носят не окончательный характер и требуют дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В.* Биоразнообразие водорослей – индикаторов окружающей среды. Тель-Авив, 2006. 500 с.
2. *Баттерби Р.В., Будаева Л.М., Гелетин Ю.В.* Особенности горных потоков Центрального Кавказа как объектов мониторинга // Экологические модификации и критерии экологического нормирования. Тр. Междунар. симпоз. Л.: Гидрометеиздат, 1991. С. 86–101.
3. *Давыдова Н.Н.* Диатомовые водоросли-индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Л.: Наука, 1985. 244 с.
4. *Дарьин А.В., Калугин И.А.* Реконструкция климата Горного Алтая по данным литолого-геохимических исследований донных осадков озера Телецкое // Изв. РАН. 2012. Сер. геогр. № 6. С. 74–82.
5. *Калугин И.А., Дарьин А.В., Бабич В.В.* 3000-летняя реконструкция среднегодовых температур Алтайского региона по литолого-геохимическим индикаторам донных осадков оз. Телецкое // ДАН. 2009. Т. 426. № 4. С. 520–522.
6. *Моисеенко Т.И.* Закисление вод: Факторы, механизмы и экологические последствия. М.: Наука, 2003. 276 с.
7. *Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А.* Формирование химического состава вод озер в условиях изменения окружающей среды. М.: Наука, 2010. 275 с.
8. *Моисеенко Т.И., Разумовский Л.В.* Новая методика реконструкции катионно-анионного баланса в озе-рах (диатомовый анализ) // ДАН. Общая биология. 2009. Т. 427. № 1. С. 132–135.
9. *Моисеенко Т.И., Разумовский Л.В., Гашкина Н.А., Шевченко А.В., Разумовский В.Л., Машуков А.С., Хорошавин В.Ю.* Палеоэкологические исследования горных озер // Вод. ресурсы. 2012. Т.39. № 5. С. 543–557.
10. *Полякова Е.И.* Диатомовый анализ. Методы палеогеографических реконструкций. М.: Изд-во МГУ, 2010. С. 126–160.
11. *Разумовский В.Л.* Долговременные изменения таксономической структуры диатомовых комплексов в двух горных озерах Кавказа // Материалы докл. III Междунар. науч. конф. Ярославль: Филигрань, 2014. С. 229–230.
12. *Разумовский В.Л.* Оценка экологического состояния высокогорных озер Приэльбрусья по результатам диатомового анализа // Вод. ресурсы. 2014. Т. 41. № 2. С. 200–205.
13. *Разумовский Л.В.* Новейшая история озера Борое по результатам диатомового анализа // Вод. ресурсы. 2008. Т. 35. № 1. С. 98–109.
14. *Разумовский Л.В., Гололобова М.А.* Реконструкция температурного режима и сопряженных гидрологических параметров по диатомовым комплексам из озера Глубокого // Вод. ресурсы. Т. 35. № 4. 2008. С. 490–504.
15. *Разумовский Л.В., Разумовский В.Л.* Регистрация новейших экосистемных событий в озере Каракель по переотложенным диатомовым комплексам // Вестн. ТюмГУ. 2013. № 12. Экология. С. 121–127.
16. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем. / Под ред. Абакумова В.А. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 320 с.
17. *Соломина О.Н., Калугин И.А., Александрин М.Ю., Бушуева И.С., Дарин А.В., Долгова Е.А., Жомелли В., Иванов М.Н., Мацковский В.В., Овчинников Д.В., Павлова И.О., Разумовский Л.В., Чепурная А.А.* Бурение осадков оз. Каракель (долина р. Теберда) и перспективы реконструкции истории оледенения и климата голоцена на Кавказе // Лед и снег. 2013. № 2 (122). С. 102–111.
18. *Тушинский Г.К.* Современное и древнее оледенение Тебердинского района // Победенные вершины. М.: Географгиз, 1949. С. 263–297.
19. *Appleby P.G.* Sediment records of fallout radionuclides and their application to studies of sediment-water interactions // Water, Air and Soil Pollution. 1997. № 99. P. 573–586.
20. *Appleby P.G., Oldfield F.* The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ²¹⁰Pb to the sediment // Catena 5. 1978. P. 1–8.
21. <http://www.radiocarbon.pl/>
22. *Nesje A.* A piston corer for lacustrine and marine sediments// Arctic and Alpine Research. 1992. V. 24. № 3. P. 257–259.
23. *Renberg I.* A procedure for preparing large sets of diatom slides from sediment cores // J. Paleolimnol. 1990. V. 4. P. 87–90.
24. *Sládeček V.* System of water quality from biological point of view // Arch. Hydrobiol. Ergeb. Limnol. 1973. № 7. 218 p.

ESTIMATION OF LONG-TERM pH CHANGES IN LAKES OF THE CAUCASUS USING A BIOINDICATION METHOD BASED ON DIATOMACEOUS ANALYSIS

L. V. Razumovskii^{1,*}, V. L. Razumovskii¹

¹ *Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*

**E-mail: l.razumovskiy1960@mail.ru*

Received: 17.02.2016

Received version received: 01.09.2016

Accepted: 29.12.2016

To analyze processes that may lead to long-term changes in pH, lake sediments from five small lakes in the Western and Central Caucasus were studied according to diatomaceous complexes from sediment cores. A proprietary principle of hydrological parameter unification was used to reconstruct numerical pH values. In isotopic dating experiments, a series of numerical pH values for 2000–130 years were generated for the lakes. These data indicate an absence of noticeable changes in pH in the lakes of the Western Caucasus and alkalization processes in the lakes of the Central Caucasus.

Key words: mountain lakes, sediments, diatomaceous analysis.

DOI: 10.31857/S0321-059646151-57