

Н. С. ХАРКЕВИЧ

ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МИККЕЛЬСКОГО ОЗЕРА И КРОШНОЗЕРА

Участвуя в разрешении проблемы повышения рыбной продуктивности водоемов Карелии, лаборатория гидрохимии Карело-Финского филиала АН СССР ставила задачу дать посезонную гидрохимическую характеристику Миккельского озера и Крошнозера.

С этой целью в течение 1953 г. и первой половины 1954 г. были проведены на постоянных станциях (приложение 1 и 2) посезонные, а летом ежемесячные гидрохимические съемки озер (по 9 на каждом озере), в результате которых прослежена динамика отдельных ингредиентов в течение года и изучены гидрохимические условия в период нагула, зимовки и нереста рыб.¹

Проведенные исследования показали, что Миккельское озеро и Крошнозеро, благодаря общим условиям формирования воды и связи между собой, по химическому составу воды очень близки. Некоторые различия в основном обуславливаются морфологическими особенностями: различными глубинами и объемом водной массы, а также характером берегов, притоков и степенью зарастаемости. По данным В. А. Фрейндлинга (1956), площадь водной поверхности Миккельского озера составляет 6,6 км², средняя глубина — 1,7 м, максимальная глубина — 2,4 м, площадь водной поверхности Крошнозера — 8,9 км², средняя глубина — 5,7 м, максимальная — 12,6 м.

КИСЛОРОДНЫЕ УСЛОВИЯ В МИККЕЛЬСКОМ ОЗЕРЕ

Для Миккельского озера характерны перенасыщение его воды кислородом летом и значительный дефицит кислорода зимой, особенно в придонных слоях.

По содержанию кислорода здесь резко выделяются три участка: 1) центральный плес и восточная прибрежная зона, характеризующиеся наиболее высокими концентрациями кислорода, содержание которого в течение года здесь колеблется в пределах 8,25—12,45 мг/л (54—133%) в поверхностном слое и в пределах 1,08—13,04 (8—126%) — в придонном; 2) северная и северо-западная прибрежные зоны, характеризующиеся более низкими концентрациями кислорода — от 10,64 до 0,88 мг/л (91—6%); 3) приустьевые участки у ручьев Сулгуоя и Пограноя, отличающиеся наиболее низкими концентрациями кислорода в летний период.

¹ В работе принимали участие лаборанты Н. П. Маслова и Е. Н. Николаева.

В качестве методического пособия использовано „Руководство по химическому анализу вод суши“ О. А. Алекина, 1941.

Выделенные по содержанию кислорода участки Миккельского озера сохраняют свои особенности и по другим гидрохимическим показателям.

Восточный берег Миккельского озера не заболочен и представляет собой преимущественно пахотные угодья; северный и северо-западный берега заболочены. Западный, южный и юго-восточный прибрежные участки находятся под влиянием притоков: с запада впадает ручей Пограноя, несущий богатую гуминовыми веществами и железом воду; с юга впадает ручей Сулгуоя, в питании которого значительную роль играют грунтовые воды, о чем свидетельствуют повышенные концентрации углекислоты, гидрокарбонатного йона, фосфатов, низкие концентрации кислорода, низкие значения окисляемости воды.

Гидрохимическую картину предустьевой зоны озера в определенные периоды года значительно изменяет впадающая с юго-востока р. Матчелица.

Сезонный ход концентраций кислорода в различных участках Миккельского озера представлен на рис. 1.

Поздняя весна (конец мая — первая половина июня). В конце мая концентрации кислорода в воде основного плеса и восточной прибрежной зоны Миккельского озера находятся в равновесном состоянии с воздухом (94—106%). Фитопланктон и водная растительность еще слабо обогащают воду кислородом. Кислород, расходующийся в значительной мере в связи с происходящим разложением прошлогодней водной растительности, быстро компенсируется из воздуха благодаря хорошему ветровому перемешиванию.

Северная и северо-западная прибрежная зона, несмотря на благоприятные условия аэрации, весной остается недонасыщенной кислородом (69—83%). Некоторый дефицит кислорода здесь связан с обедненным кислородом стоком с заболоченных берегов. Кроме того, в этом участке сосредоточены мощные заросли надводной растительности, на разложение которой расходуется большое количество кислорода. Еще более бедны кислородом в этот период участки озера у ручьев Пограноя (4,02 мг/л, или 52% насыщения) и Сулгуоя (5,86 мг/л, или 58% насыщения). Указанные ручьи несут бедную кислородом воду: первый вследствие болотного питания, второй в связи с участием в его питании грунтовых вод.

Однако зоны распространения воды указанных ручьев и размеры прибрежных участков с дефицитом кислорода невелики. Они ограничиваются прибрежной полосой до 100—200 м ширины.

Летний период (конец июня—август). Кислородные условия в основной части озера в летнее время весьма благоприятные. В течение июня и июля в центральном плесе и восточной прибрежной зоне отмечается перенасыщение воды кислородом (111—133% насыщения в дневное время), обусловленное фотосинтетической деятельностью интенсивно развивающегося фитопланктона и подводной высшей растительности. Даже при условии хорошего ветрового перемешивания воды Миккельского озера (вследствие его мелководности) избыток кислорода, продуцируемый водорослями, не успевает удаляться. В начале лета наиболее высокие концентрации кислорода (126%) относились к центральной части озера с максимальными глубинами (2,4 м). В середине и второй половине лета, наоборот, максимальные концентрации падают на более мелководные участки центрального плеса и восточную прибрежную зону. Это объясняется тем, что в первой половине лета обогащение воды кислородом идет за счет фитопланктона, имеющего более высокую продукцию на глубинах. К середине лета продуцировать кислород начинают также появляющиеся заросли подводной растительности, кото-

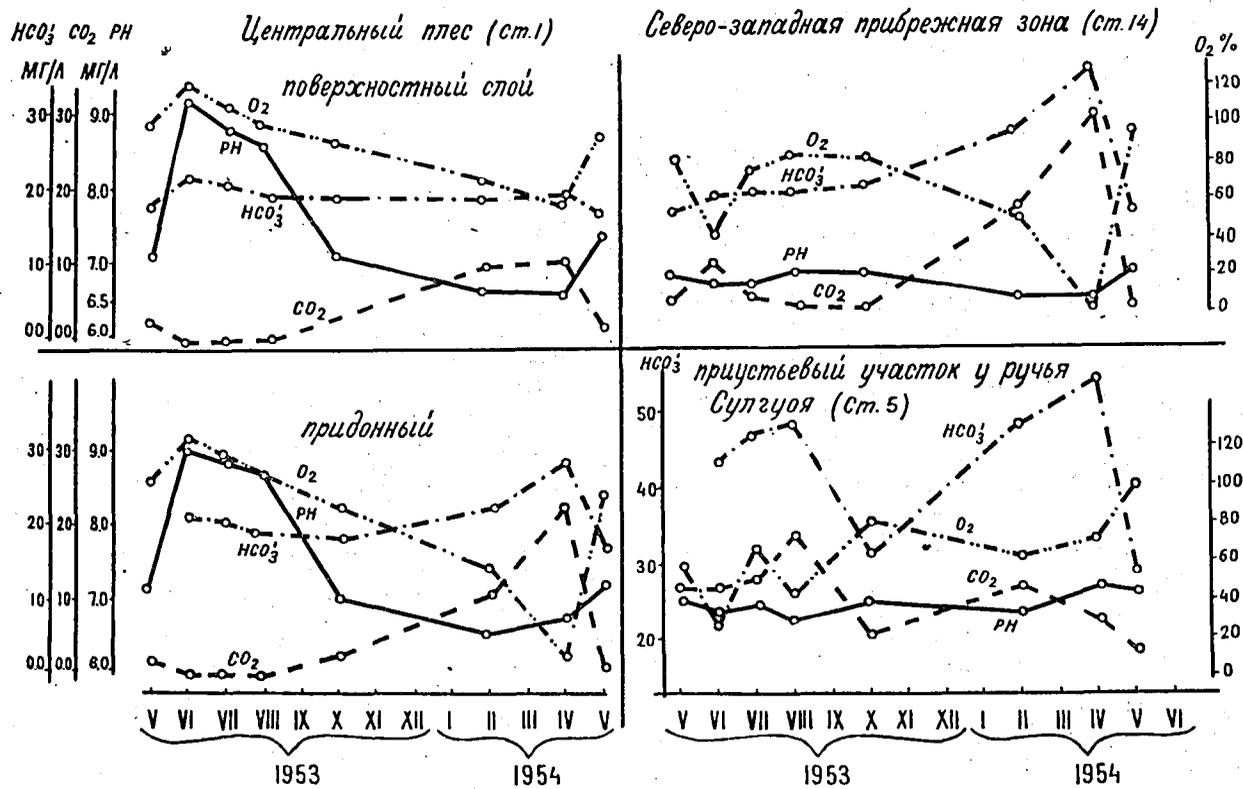


Рис. 1. Сезонные изменения O_2 , pH, CO_2 и HCO_3^- в Миккельском озере.

рые значительно обильнее распространены на мелководьях. К концу лета концентрации кислорода в центральном плесе, восточной и северо-восточной прибрежных зонах сохраняются высокими (в пределах 10,24—10,71 мг/л). Однако вследствие снижения фотосинтетических процессов процент насыщения падает до 105—112. При этом более высокий процент насыщения наблюдался также на станциях восточной прибрежной зоны.

Распределение кислорода по вертикали весной и в летний период в Миккельском озере совершенно однородно.

В северной и северо-западной прибрежных областях кислородные условия в летний период менее благоприятны, чем в центральной части (от 42% насыщения в июне до 85% в конце августа). Летний дефицит кислорода в этом участке обусловлен в первую очередь заболоченностью берегов, а также сильно развитой надводной растительностью (тростник, камыш), способствующей развитию застойных явлений и потребляющей много кислорода при процессах разложения. В обогащении же воды кислородом надводная растительность, как известно, не участвует.

Очень низкие концентрации кислорода летом наблюдались вблизи устья ручья Сулгуоя (рис. 1), что связано с возрастанием доли грунтового питания ручья.

Несколько особняком по летнему кислородному режиму стоят участки озера, примыкающие к устьям ручья Пограноя и р. Матчелицы. Вода ручья Пограноя в июне и июле небогата кислородом, но в Миккельском озере в 45 м от устья 23 июня была определена максимальная для озера величина насыщения—140%, что, повидимому, связано с фотосинтезом фитопланктона, который дал пышное развитие на стыке гумифицированных вод ручья Пограноя и собственно миккельских вод. Гумусовые вещества, содержащие в своем составе азот, а также удерживающиеся посредством адсорбционной связи значительные количества фосфора, попадая в благоприятные температурные и кислородные условия, подвергаются усиленному окислению и освобождают питательные вещества, обуславливающие высокое развитие фитопланктона. Характерно, что концентрации фосфатов здесь в это время были заметно выше, чем в центральном плесе (0,035 мг/л Р против 0,007 мг/л).

В участке озера, примыкающем к устью р. Матчелицы, а также в р. Матчелице в мае и июне кислородные условия вполне благоприятные (111%). Однако в конце июля в р. Матчелице уже обнаруживается дефицит кислорода до 30%. Соответственно снижается насыщение кислорода и в предустьевой части озера. К концу августа концентрации кислорода еще более падают, достигая своего наименьшего значения в годовом цикле (52% насыщения).

Указанная картина летнего кислородного режима р. Матчелицы и прилегающего к ее устью участка озера обуславливается развивающимися к середине лета застойными явлениями, связанными со значительным падением уровня и скорости течения, а также сильной зарастаемостью реки. Кроме того, во второй половине лета резко возрастает потребление кислорода отмирающей водной растительностью. Отчасти дефицит кислорода увеличивается обедненным кислородом стоком с заболоченных берегов реки. Застойные явления характерны также и для приустьевого участка озера вследствие его сильной зарастаемости.

Наблюдения за суточным ходом концентраций кислорода в Миккельском озере в летний период (июль) показали, что в центральном плесе и восточной прибрежной зоне кислородные условия в течение суток во всей толще воды вполне благоприятны (рис. 2). В северной и северо-западной прибрежной области наблюдающийся в течение суток

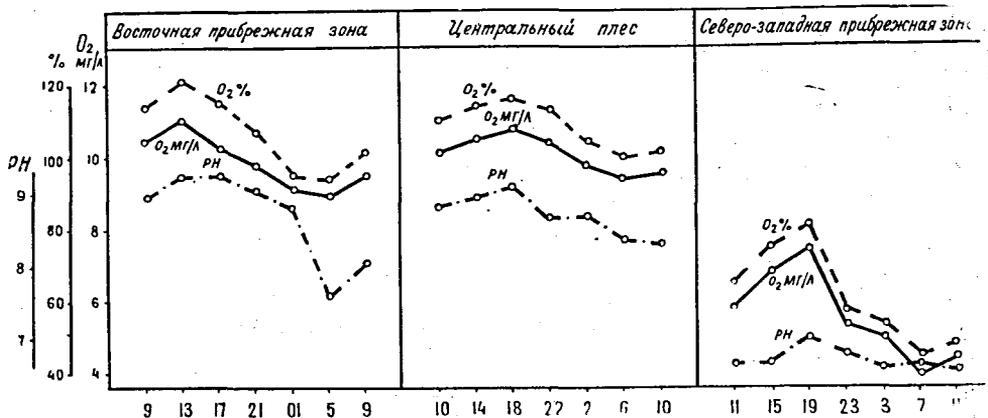


Рис. 2. Суточные изменения O_2 и pH в Миккельском озере (25 и 26 июля 1953 г.).

дефицит кислорода резко усугубляется в ранние утренние часы, составляя около 50% от нормального насыщения.

Период охлаждения озера (сентябрь — октябрь). В период охлаждения озера абсолютные концентрации кислорода возрастают, хотя насыщение несколько ниже 100%. Так, 16—18 октября при температуре 4,5—6° содержание кислорода в Миккельском озере колебалось в пределах 9,84—12,47 мг/л (73—97%).

На основании проведенных исследований можно сделать заключение, что озеро к периоду ледостава подходит достаточно обогащенным кислородом.

Подледный период (ноябрь — апрель). Характерной особенностью зимнего периода является вертикальная стратификация в распределении кислорода, резко возрастающая к концу подледного периода. В конце зимы стратификация кислорода ярко выражена даже в пределах высоты батометра как в поверхностном слое воды, так и в придонном. Микро-слоистость в распределении кислорода уже намечалась в феврале, но была выражена слабее.

Для зимнего периода также характерно общее снижение концентраций кислорода. При этом к началу февраля в центральном плесе они заметно падают только в придонном слое (до 55% насыщения), оставаясь довольно высокими в поверхностных слоях (85—70%).

В северной и северо-западной прибрежных зонах, а также у устья ручья Пограноя к началу февраля содержание кислорода значительно снижается и в поверхностных слоях (до 50% нормального насыщения).

К концу зимы дефицит кислорода значительно возрастает. Особенно резко он выражен на центральной станции (насыщение в поверхностном слое 59%, в придонном — 8%), а также в северной и северо-западной прибрежной зоне (насыщение 8—6%), в приустьевых участках ручьев Пограноя и Сулгуоя (насыщение 2—8%).

Наиболее богат кислородом зимой участок озера, примыкающий к устью р. Матчелицы (85—75% нормального насыщения). Это объясняется тем, что почти в течение всей зимы вблизи устья в р. Матчелице сохраняется полынья, через которую происходит обогащение воды кислородом из воздуха.

Высокие концентрации кислорода в течение всей зимы наблюдаются также во всей восточной части центрального плеса и в восточной прибрежной зоне, что обуславливается продвижением богатых кислородом

вод из устья р. Матчелицы и приустьевого участка озера по восточной части его к истоку р. Миккельской. При этом поток обнаруживается и в северной части центрального плеса (в 400 м от мыса Хопунёкка). Западная и северо-западная части озера в зимнем водообмене участвуют в меньшей степени. Замедленный водообмен наряду со значительными биохимическими процессами, происходящими в зонах зарослей, а также бедный кислородом сток из ручьев обуславливают в основном наблюдающийся здесь дефицит кислорода.

На основании зимних исследований можно сделать заключение, что наиболее благоприятными по кислородным условиям для зимовки рыб являются юго-восточная, восточная, северо-восточная и северная части центрального плеса. Самые прибрежные участки не могут служить обиталищем рыб вследствие их промерзаемости. Не промерзающие целиком северный и северо-западный прибрежные участки, а также западная часть озера неблагоприятны для зимовки рыб вследствие значительного дефицита кислорода, заметно возрастающего с глубиной.

Период после вскрытия озера. Исследования, проведенные на 6—8 день после вскрытия озера (16—18 мая 1954 г.), показывают, что распределение кислорода во всех участках озера становится почти однородным. При этом концентрации кислорода в абсолютных показателях в этот период являются наиболее высокими из всех сезонов года.

Наблюдалось некоторое перенасыщение кислородом (102—111%), связанное, повидимому, с явлением гистерезиса, так как вследствие наступления теплых дней очень быстро повышалась температура воды, за которой не успевало устанавливаться газовое равновесие. Однако в восточной прибрежной зоне и у р. Матчелицы некоторое перенасыщение (110—111%) возможно за счет фотосинтеза фитопланктона.

КИСЛОРОДНЫЕ УСЛОВИЯ В КРОШНОЗЕРЕ

Благодаря большей площади и глубине, а также меньшему (в отношении к объему озерной воды) речному стоку в озеро кислородные условия в Крошнозере имеют некоторые особенности по сравнению с Миккельским озером. Особенности эти сводятся к следующему:

- а) перенасыщение воды кислородом летом наблюдается только в прибрежных участках и на мелководных станциях центрального плеса;
- б) стратификация кислорода по вертикали отчетливо выражена не только зимой, но и летом;
- в) распределение кислорода по площади озера более равномерное, чем в Миккельском озере;
- г) зимой Крошнозеро богаче кислородом по сравнению с Миккельским озером.

В течение года в Крошнозере содержание кислорода испытывало колебания в поверхностном слое от 13,85 до 6,38 мг/л (от 125 до 67%), в придонном слое нижний предел содержания кислорода падал до 2,15 мг/л (16%).

В распределении кислорода по площади озера отмечается определенная закономерность. Концентрации его постепенно падают с северо-запада на юго-восток и с прибрежных участков — к центру. Весной и в начале лета западная часть озера характеризуется более высокими концентрациями кислорода по сравнению с восточной (главным образом в центральном и северном участках озера). В середине и конце лета наблюдается обратная картина.

Реки, впадающие в Крошнозеро, несколько беднее его кислородом, но эта разница столь невелика, что не сказывается отрицательно на

газовом режиме предустьевых участков озера. Некоторым исключением является болотный ручей Явиеноя, который в период своего половодья (июнь) значительно снижает концентрации кислорода в предустьевом участке озера, внося свои чрезвычайно бедные кислородом воды ($1,89 \text{ мг/л}$). Отчасти то же относится и к протоке, соединяющей небольшую гумифицированную ламбу с Крошнозером в южном его конце.

Весенний период (май — первая половина июня). Наиболее высокие концентрации кислорода в Крошнозере были определены весной 1954 г. (21—23 мая) после освобождения озера ото льда ($11,98$ — $13,85 \text{ мг/л}$, или 100—125%).

Богаче кислородом в это время северная часть озера, а также западная прибрежная зона, что объясняется лучшим прогреванием данных участков: северная часть озера прогревается быстрее вследствие мелководности, а западная часть — благодаря тому, что господствующие в это время северные и северо-восточные ветры сгоняют поверхностные более нагретые воды к западному берегу, а более холодные придонные воды за счет компенсационного течения сползают к восточному берегу. В более прогретых участках выше развитие фитопланктона, за счет фотосинтеза которого вода обогащается кислородом.

Стратификация кислорода по вертикали весной едва улавливается.

Летний период (конец июня — август). Летом в связи с повышением температуры воды абсолютные значения концентраций кислорода снижаются. К концу июня по всему озеру в поверхностных слоях определены концентрации в пределах $11,38$ — $8,91 \text{ мг/л}$. В придонных слоях нижняя граница концентраций опустилась до $7,32 \text{ мг/л}$. Однако процент насыщения к концу июня возрастает.

Наиболее богаты кислородом (109—118% насыщения), как и весной, северное мелководье, западная прибрежная зона средней части озера и участок озера в районе деревень Котчуры и Ершнаволока. На глубоководных станциях вдоль длинной оси озера концентрации кислорода ниже. Насыщение в поверхностных слоях порядка 99—103%, в придонных слоях оно падает до 89% в центральной части и до 67% — в южной. Как видно из приведенных данных, к концу июня устанавливается отчетливая стратификация по вертикали с градиентом до $1,0 \text{ мг/л O}_2$ в средней части озера и $2,13 \text{ мг/л}$ — в южной.

К середине лета концентрации кислорода в озере находятся в тех же пределах, что и в июне. Однако наиболее высокие концентрации (116—124% насыщения) определены в северном мелководье и восточной прибрежной зоне, в то время как в западной прибрежной зоне концентрации кислорода понизились до 90—96%; только в районе деревни Котчуры и р. Холмы отмечалось попрежнему перенасыщение воды кислородом (110—117%).

На глубоководных станциях к середине лета (конец июля) стратификация по вертикали становится еще резче, особенно в южной части озера, где в поверхностном слое концентрация кислорода составляла $8,50 \text{ мг/л}$, а в придонном — $4,70 \text{ мг/л}$. Характерно, что резкое падение в содержании кислорода наблюдается только глубже 5 м (рис. 3). Таким образом, в течение лета перемешивание воды в Крошнозере довольно глубокое, и только самый придонный слой воды слабо захватывается им. Более глубокие застойные явления, а отсюда и больший дефицит кислорода создаются в южной части озера; значительно слабее они в средней и совершенно отсутствуют в северной части, где в придонных слоях дефицита кислорода не наблюдается.

К концу лета (конец августа) по мере снижения температуры воды и установления почти полной гомотермии в большей части озера глу-

бинные слои вовлекаются в циркуляцию, и кислород оказывается равномерно распределенным во всей толще воды (рис. 3).

Однако в самой южной части гомотермия, а следовательно, и го-моокисления наступают несколько позже. Придонные слои здесь к концу августа только частично начинают включаться в циркуляцию (концентрация кислорода в придонном слое возрастает только до 5,74 мг/л).

Вовлечение придонных слоев в циркуляцию вызывает в этот период резкое снижение содержания кислорода в более верхних слоях воды. Поэтому в конце августа во всем озере наблюдаются минимальные в годовом цикле абсолютные концентрации кислорода в верхних слоях воды (10,68—7,77 мг/л.). Перенасыщение воды кислородом отмечено только в районе влияния ручья Лебреоя (до 110%). В северной мелко-водной части насыщение колеблется около 100%, в средней и южной

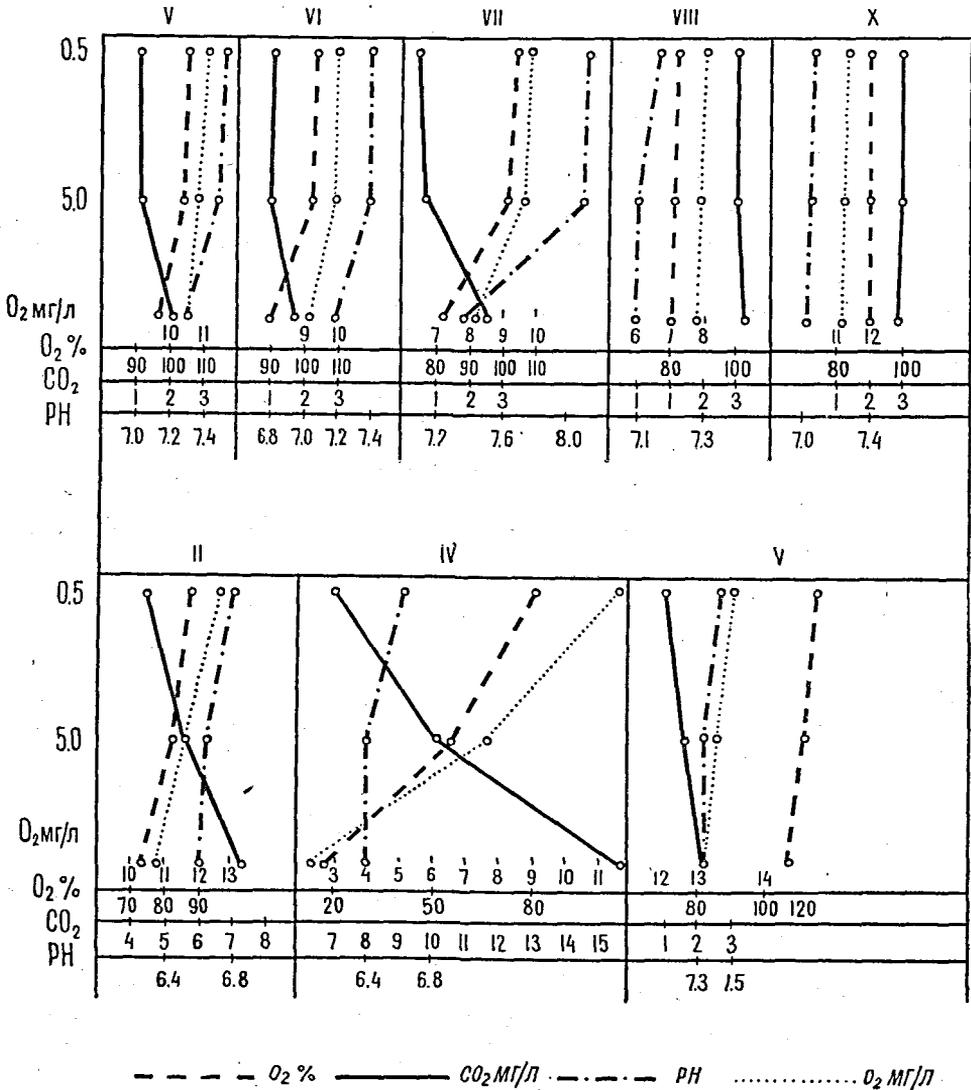


Рис. 3. Вертикальное распределение O₂, CO₂ и pH на центральной станции среднего участка Крошнозера. (1953—1954 гг.)

части в поверхностных слоях обнаружен дефицит кислорода от 8 до 20%.

Подледный период. Осенью в момент охлаждения озера до 7—5° (середина октября) концентрации кислорода в озере возрастают до 11—12 мг/л. Распределение по акватории и по глубине почти равномерное. Несмотря на общее повышение концентраций, относительная насыщенность кислородом ниже нормальной (88—93%). В процессе дальнейшего охлаждения озера, вплоть до ледостава, происходит постепенное обогащение воды кислородом. В связи с этим в середине февраля абсолютные значения концентраций кислорода в основной толще воды заметно выше, чем они были в октябре (до 13 мг/л). Насыщение в феврале колеблется в пределах 74—89%. Стратификация по вертикали выражена слабо.

К концу зимы (конец марта) в поверхностных слоях воды концентрации кислорода снижаются мало по сравнению с февралем (74—85% насыщения). В глубинных же слоях они резко падают (до 33—17% у дна). Отсюда в конце зимы отмечается наиболее резко выраженная стратификация кислорода (рис. 3). Наибольший дефицит кислорода в конце зимы, относящийся к максимальной глубине озера (11,8 м — у северной оконечности деревни Спиридонноволок), составлял 84%. Однако верхний пятиметровый слой в этом пункте имел 79—70% насыщения. На мелководных станциях дефицит кислорода на дне не превышал 54%.

И. В. Барановым (1950) при исследованиях Крошнозера в апреле 1949 г. установлен значительно больший дефицит кислорода у дна — 91% (концентрация 1,20 мг/л), однако в верхнем шестиметровом слое дефицит не превышал 34%.

Таким образом, сезонная динамика и вертикальное распределение кислорода в Крошнозере с явно выраженным резким потреблением его у дна в период стагнаций свидетельствуют о повышенной трофичности данного водоема. Однако, как показывают наши данные, полного исчезновения кислорода у дна не наблюдается. По кислородным условиям во все периоды года озеро вполне благоприятно для жизни. Явлений замора не следует ожидать даже в ямах, хотя газовые условия для зимнего обитания рыб в них менее благоприятны, чем в других участках.

РЕЖИМ СВОБОДНОЙ УГЛЕКИСЛОТЫ

Характерной особенностью обоих озер, отличающей их от ряда уже исследованных ранее озер Карелии, является практическое исчезновение свободной углекислоты в некоторых участках в летний период.

В Миккельском озере свободная углекислота летом отсутствует во всем центральном плесе и восточной прибрежной зоне. Концентрации углекислоты в течение года здесь изменяются от 0,0 до 13,1 мг/л в поверхностном слое и от 0,0 до 25,1 мг/л — в придонном.

Уже в конце мая концентрации углекислоты в этих участках не превышают 3,4 мг/л, а местами составляют около 0,7 мг/л. С конца июня и до конца августа углекислота здесь практически отсутствует, в растворе появляется карбонатный йон (до 4,25 мг/л). Это свидетельствует о высокой интенсивности процессов фотосинтеза, благодаря которой потребляется вся углекислота, а затем происходит и разложение гидрокарбонатов. Подтверждением этому служит наблюдавшееся длительное цветение воды и обильное развитие подводной растительности.

Однако в пределах Миккельского озера имеются участки, где углекислота присутствует круглогодично. Так, в северной и северо-

западной прибрежных зонах, которые характеризовались низкими концентрациями кислорода, концентрации углекислоты не падали летом ниже $4,0 \text{ мг/л}$ и минимально низкими были в период осенней циркуляции воды ($3,8 \text{ мг/л}$).

В районе влияния ручья Сулгуоя летние концентрации углекислоты оказались самыми высокими в годичном цикле для этого участка, а также и для летнего периода в пределах всего озера (рис. 1).

Режим углекислоты в этом участке, как и режим кислорода, в значительной степени связан с грунтовым питанием ручья Сулгуоя, доля которого возрастает во второй половине лета.

В участке, примыкающем к устью ручья Пограноя, наблюдались довольно высокие концентрации углекислоты (до $16,0 \text{ мг/л}$ в мае и до $23,8 \text{ мг/л}$ в феврале). Летом они снижались и иногда падали до нуля (например, в июне 1953 г., в момент перенасыщения воды кислородом).

В зоне влияния р. Матчелицы свободная углекислота отсутствует только в конце июня, а затем параллельно снижению концентраций кислорода возрастают концентрации углекислоты (до $4,7 \text{ мг/л}$ в августе).

В период осеннего охлаждения озера участки, в которых свободная углекислота присутствует круглогодично, характеризуются наиболее низкими ее концентрациями в их годовом цикле, но все же они остаются более высокими, чем в центральном плесе, где вследствие ослабления фотосинтеза углекислота присутствует в небольших концентрациях ($1,6\text{--}3,0 \text{ мг/л}$). Распределение углекислоты по вертикали весной, летом и осенью в Миккельском озере однородное.

Подходя к ледоставу с весьма незначительными концентрациями углекислоты, Миккельское озеро в течение зимнего периода накапливает довольно большие ее количества. Так, к середине зимы (начало февраля) концентрации углекислоты в поверхностном слое центрального плеса возросли более чем в 3 раза (с $2,3 \text{ мг/л}$ в октябре до $8,4 \text{ мг/л}$ в феврале), а в придонном — в 4 раза (с $2,3$ до $10,6 \text{ мг/л}$). В северной и северо-западной прибрежных зонах содержание углекислоты повысилось более чем в 4 раза (с $3,8$ до $16,1 \text{ мг/л}$). Наиболее высокие концентрации углекислоты, как и следовало ожидать, во всех участках озера накапливаются к концу подледного периода вследствие того, что образование ее в течение зимы происходит непрерывно, а газообмен с воздухом, также как и потребление углекислоты в процессе фотосинтеза, длительное время отсутствует (рис. 1).

В отличие от других сезонов года зимой в Миккельском озере в распределении углекислоты по вертикали устанавливается отчетливая стратификация, особенно возрастающая к концу зимы. Распределение углекислоты зимой по площади озера прямо противоположно распределению кислорода (рис. 1). Поэтому участки, неблагоприятные для жизни рыб по содержанию кислорода, неблагоприятны и по концентрациям углекислоты.

Сравнительно большие концентрации углекислоты, накопившиеся за зиму, после вскрытия озера очень быстро исчезают. На 6—7 день после освобождения озера ото льда (в 1954 г. 16—18 мая) концентрация углекислоты по всему озеру находилась в пределах $0,9\text{--}3,9 \text{ мг/л}$, и только в участке, где в весенний паводок значительно возрастает влияние болотного питания ручья Пограноя, концентрация углекислоты составляла $6,9 \text{ мг/л}$. Распределение по глубине в это время становится однородным.

Максимальные границы концентраций углекислоты, относящиеся к зимнему периоду, в Крошнозере значительно ниже, чем в Миккельском озере. В поверхностном слое воды Крошнозера в течение года содер-

жание углекислоты колебалось в пределах 0,0—11,8 мг/л, в придонном слое — в пределах 0,0—16,0 мг/л.

Однако летние концентрации углекислоты в Крошнозере несколько выше, чем в Миккельском. В Крошнозере полное потребление углекислоты наблюдалось только в прибрежных и более мелководных участках, перенасыщенных кислородом. В более глубоководных участках, занимающих всю центральную и южную части озера, даже в самом поверхностном слое углекислота целиком никогда не исчезала. Концентрации ее в течение лета здесь находились в пределах 0,4—2,0 мг/л в поверхностном слое, повышаясь ко дну до 2,2 мг/л в центральной части и до 6,3 мг/л — в южной.

В участках с полным потреблением свободной углекислоты наблюдалось разложение гидрокарбонатов и появление в растворе карбонатного йона, однако максимальные концентрации его в Крошнозере не превышали 3,65 мг/л.

К концу лета в Крошнозере, в противоположность Миккельскому озеру, свободная углекислота появляется во всех участках. Концентрации ее колебались в пределах 0,7—4,6 мг/л.

Указанные различия газовых условий обоих озер свидетельствуют о том, что в Крошнозере по сравнению с Миккельским озером ниже интенсивность фотосинтеза летом и биохимических процессов зимой. Повидимому, это связано с меньшей зарастаемостью Крошнозера высшей водной растительностью вследствие его значительных глубин.

Следует отметить, что летом концентрации углекислоты на средних станциях выше, чем на прибрежных, а по длинной оси озера концентрации увеличиваются с северо-запада на юго-восток. В южном конце озера резче и стратификация по вертикали. Зимой более богаты углекислотой прибрежные участки. Особенно выделялись повышенным содержанием углекислоты приустьевые участки рек и ручьев. Так, в середине зимы концентрации углекислоты в собственно озерной воде составляли около 5,5 мг/л (в поверхностном слое), а в районе влияния ручья Лебреоя — 6,9 мг/л, у устья р. Холмы — 8,9 мг/л, в Школьной губе (впадает ручей Шогаоя) — 10,1 мг/л.

Зимой воды рек и ручьев расстилаются по поверхности озерной воды. Поэтому в районе влияния притоков наиболее высокие концентрации углекислоты, а также наиболее низкий рН отмечены в поверхностных слоях воды. В среднем горизонте определены минимальные концентрации углекислоты, которые снова возрастают ко дну.

Наиболее высокие концентрации углекислоты в озере создаются к концу зимы. Однако свыше 50% ее зимнего запаса накапливается уже в середине зимы (рис. 3).

После вскрытия льда с началом весенней циркуляции воды озеро быстро освобождается от зимних запасов углекислоты. Последняя остается в пределах 0,4—2,8 мг/л во всей толще воды.

АКТИВНАЯ РЕАКЦИЯ (рН)

Активная реакция воды в основном зависит от колебаний свободной углекислоты. Границы колебаний величины рН в течение года в Миккельском озере и Крошнозере большие: от 6,40 до 9,45 в Миккельском озере и от 6,40 до 9,22 в Крошнозере.

Указанные границы характерны не для всех участков озер. В некоторых участках Миккельского озера эти границы значительно уже (рис. 1).

В Крошнозере также более глубоководные станции характеризуются меньшими колебаниями величины рН, чем мелководные станции. Например, в северо-западной мелководной части величина рН колебалась в течение года от 6,40 до 8,17, а в южной части озера — от 6,60 до 7,40.

Сезонные изменения величины рН в некоторых участках Миккельского озера представлены на рис. 1, Крошнозера — на рис. 3.

Наиболее низкие значения рН в обоих озерах наблюдались в конце зимнего периода. В зимний период почти сглаживаются различия в величине рН между обоими озерами, а также и внутри каждого озера как по площади, так и по глубине. Значения рН по обоим озерам зимой колеблются в пределах 6,40—6,80 (слабокислая реакция воды). Характерно, что основное снижение рН происходит в первой половине зимы. Во второй половине зимы, несмотря на продолжающееся возрастание на некоторых станциях концентраций углекислоты, особенно в придонных слоях, рН изменяется незначительно, так как вместе с накоплением углекислоты возрастают концентрации гидрокарбонатного йона.

При крайне незначительных зимних колебаниях величины рН по площади озер в Миккельском озере все же можно выделить три участка. Наиболее высокими значениями рН характеризуется приустьевой участок у ручья Сулгуоя, наиболее низкими — северная и северо-западная части озера.

В Крошнозере более низкие значения рН характерны для участков, находящихся под влиянием р. Холмы и ручья Шогаоя. Здесь, как уже отмечалось, поверхностный слой воды имеет более низкий рН по сравнению с нижележащими слоями. В других участках озера наблюдалась обратная картина.

После вскрытия льда рН в обоих озерах заметно возрастает (до 7,10—7,75) вследствие быстрого освобождения водной массы от запаса углекислоты.

Чрезвычайный интерес представляет активная реакция воды озер Миккельского и Крошнозера в летний период. Здесь впервые в условиях Карелии мы встретились с явлением повышения рН до 9,45. Это явление связано с тем, что в результате интенсивной ассимиляции организмами углекислоты последняя из воды исчезает целиком, при этом начинается распад гидрокарбонатов и образование карбонатного йона.

Уже в конце июня во всем центральном плесе, а также в юго-восточной, восточной и северо-восточной прибрежных зонах Миккельского озера углекислота в дневные часы исчезает, и рН поднимается до 9,00—9,40. Наиболее высокий уровень рН определен у устья р. Матчелицы, на центральной станции и у истока р. Миккельской. В последующие летние месяцы рН в указанных частях озера остается высоким, но подобно тому, как это наблюдалось в распределении углекислоты, наиболее высокие значения рН становятся характерными для восточной прибрежной зоны и участка у истока р. Миккельской. Здесь к середине лета усиливаются ассимиляционные процессы за счет развития водной растительности. В центральном плесе рН падает до 8,80 в июне и до 8,60 в августе.

В приустьевом участке р. Матчелицы в связи с указанными выше особенностями газового режима уже в конце июля рН не превышал 7,10, а к концу августа снизился до 6,80.

Что же касается северной и северо-западной прибрежных зон, а также участка, испытывающего влияние ручья Сулгуоя, то здесь активная реакция в течение всего лета остается близкой к нейтральной (с уклоном в кислую сторону) и испытывает крайне незначительные колебания (рис. 1). В приустьевом участке озера у ручья Пограноя

летние колебания рН более резкие. В конце мая здесь, благодаря повышенному болотному стоку, рН был около 6,16. К концу июня в связи с отмеченным выше фактом полного исчезновения углекислоты и максимально высокого насыщения кислородом рН также возрос до 8,75; к концу июля он снизился до 7,10.

Суточные колебания рН в отдельных участках Миккельского озера (рис. 2) оказались различными и свидетельствуют о различной интенсивности тех или иных биологических и биохимических процессов (фотосинтеза, микробного разложения органического вещества и т. д.).

Данные суточных наблюдений изменения рН показывают, что высокие значения рН летом обусловлены энергичными фотосинтетическими процессами.

В отличие от Миккельского озера в Крошнозере высокий рН в летний период характерен только для прибрежных зон и более мелководных участков.

Так, в конце июня на центральных станциях по всей длине озера рН, как и в мае, находится в пределах 7,60—7,40, опускаясь в придонных слоях до 7,20 и даже до 6,90. На ряде станций западной и восточной прибрежных зон рН поднимается до 8,30—8,95. Эти же участки характеризовались полным отсутствием углекислоты.

Максимально высокие значения рН были определены в западной части озера, где более интенсивно протекали фотосинтетические процессы.

В период максимального прогресса озера (июль и начало августа) более высокие значения рН отмечаются на большей площади Крошноозера. Так, во всем северном мелководье, в восточной части среднего участка озера, включая и центральную станцию, в участке озера, расположенном между деревнями Котчур — Ершнаволок — Спиридоннаволок и р. Холма, рН колебался в пределах 8,00—9,20.

Однако вся западная прибрежная полоса северного и центрального участков, а также весь южный конец озера отличаются значительно более низкими рН (7,00—7,60 в поверхностных слоях и 6,90—6,80 в придонных).

В середине лета в Крошнозере довольно резко выражено различие в величине рН по вертикали (рис. 3).

К концу лета в связи с понижением фотосинтетических процессов и почти полной циркуляцией воды рН в Крошнозере становится ниже и однообразнее по площади и глубине. Значения его во всем озере находились в пределах 7,80—7,00. Более высокие значения рН относились к северному мелководью и прибрежным зонам; более низкие — на глубоководных станциях.

Осенью, в период уже значительного охлаждения воды озер, когда фотосинтетические процессы затухают, но в то же время озеро в процессе циркуляции водной массы непрерывно освобождается от излишка углекислоты, активная реакция в обоих озерах колеблется около нейтральной. Различие рН по площади отчетливее выражено в Миккельском озере, чем в Крошнозере.

ГАЗОВЫЕ УСЛОВИЯ И АКТИВНАЯ РЕАКЦИЯ ВОДЫ МИККЕЛЬСКОГО ОЗЕРА В ПЕРИОД НЕРЕСТА ЛЕЩА И ПЛОТВЫ

Нерест леща и плотвы происходит преимущественно в последней декаде мая и первой декаде июня. Общие гидрохимические условия в период нереста нами характеризуются как весенние условия. Однако места нереста в Миккельском озере подвергались самостоятельным исследованиям, результаты которых частично представлены в таблице 1.

Таблица 1

Газовые условия и активная реакция воды (рН)
на нерестилищах леща и плотвы в Миккельском
озере в 1954 г.

Местоположение станций	Дата исследования	Глубина станции (в м)	Глубина взятия пробы (в м)	Температура воды (в °С)	рН	O ₂		CO ₂ мг/л	Примечание
						мг/л	%		
Центр озера	25/V	2,0	0,5	18,0	7,40	10,49	108	1,3	Характеризует озеро в целом
У мыса Кивинёкка . .	25/V	0,3	0,3	16,0	6,75	7,18	71	5,3	
У мыса Хаубаннёкка .	25/V	0,2	0,2	18,0	6,60	5,22	54	9,0	Нерестилище плотвы
В 15 м от берега западнее мыса Хаубаннёкка .	1/VI	0,3	0,2	13,4	6,65	5,74	54	8,4	
Центр озера	1/VI	2,4	0,5	13,6	7,35	10,18	96	1,3	Характеризует озеро в целом
			2,2	12,8	7,35	9,95	93	1,3	
У западного берега мыса Хопуннёкка .	25/V	0,2	У поверхности	19,8	7,25	10,09	108	2,1	Икры не обнаружено

Из таблицы 1 видно, что газовые условия на нерестилищах плотвы и леща значительно хуже, чем в центральном плесе.

Проведенные в течение двух сезонов наблюдения газового режима на нерестилищах наглядно показывают, что в период икрометания, а также на первых стадиях развития личинок лещ и плотва не требуются к газовым условиям и могут переносить довольно заметные колебания в содержании кислорода. Они выносят значительный дефицит кислорода (до 46%) и значительные концентрации углекислоты (8,4—9,0 мг/л).

Активная реакция (рН) на нерестилищах также испытывает большие колебания и чаще является слабокислой. Нерестилища леща и плотвы сосредоточены в основном в участках с наиболее низкими в пределах озера значениями рН. Такие значения рН характерны для многих озер Карелии, где, однако, лещ не водится.

Нам кажется, что ни газовые условия, ни активная реакция воды не являются теми решающими факторами, благодаря которым Миккельское озеро стало естественным инкубатором икры леща. Скорее всего леща для нереста привлекают здесь физические факторы: температурные условия, мелководность и обилие водной растительности.

Химические факторы, повидимому, начинают оказывать существенное влияние несколько позднее, в период личиночной стадии и откорма молоди. В пользу этого предположения свидетельствует тот факт, что вскоре после выклеывания личинки начинают мигрировать в восточную часть озера, где в этот период наблюдаются лучшие газовые условия и наиболее высокие значения рН — условия, отличные от летних условий в других озерах Карелии.

Химические факторы, кроме того, имеют огромное косвенное значение в обеспечении за Миккельским озером роли естественного питомника, обуславливая высокую питательную базу для молоди. Миккельское

озеро по сравнению с другими исследованными озерами Карелии богаче минеральным азотом и фосфором, благодаря чему почти в течение всего лета и весны здесь наблюдается массовое развитие первичной продукции — фитопланктона. Фитопланктон непосредственно или вместе с бактериальной флорой, обильно развивающейся при его разложении, представляет питательную базу для зоопланктона, которым питаются мальки, а возможно, и прямо служит пищей для мальков.

ЙОННЫЙ СОСТАВ И МИНЕРАЛИЗАЦИЯ ВОДЫ ОЗЕР МИККЕЛЬСКОГО И КРОШНОЗЕРА

Вода озер Миккельского и Крошнозера может быть охарактеризована как гидрокарбонатно-кальциевая. Минерализация ее в основном обуславливается гидрокарбонатами. Однако концентрации основного йона небольшие. Наиболее характерными для обоих озер являются концентрации в пределах 16—20 мг/л HCO_3^- ; в отдельных участках Миккельского озера они доходят до 54,3 мг/л, в Крошнозере — до 39 мг/л.

По распределению гидрокарбонатного йона в Миккельском озере можно выделить те же характерные участки, которые отмечались при описании газового режима и активной реакции (рис. 1).

Весь центральный плес озера, а также юго-восточный, восточный и северо-восточный прибрежные участки характеризуются близкими концентрациями HCO_3^- с небольшой амплитудой колебаний в течение года (от 16,5 до 21,4 мг/л в поверхностном слое и от 16,0 до 28,7 мг/л в придонном). В летний и осенний периоды к этим участкам примыкают северная и северо-западная части озера, включая и прибрежную зону. Однако зимой эта часть озера отличается более повышенными концентрациями гидрокарбонатного йона. У мыса Хопуннекка содержание его в течение года испытывает колебания от 16,5 до 34,8 мг/л, а в 150—200 м от устья ручья Пограноя — от 15,9 до 48,8 мг/л. Наконец, совершенно выделяется по содержанию гидрокарбонатного йона, как это отмечалось и для других показателей, участок озера, примыкающий к устью ручья Сулгуоя. Здесь в течение года концентрации его колеблются от 28,7 до 54,3 мг/л.

Как правило, наиболее высокие концентрации гидрокарбонатного йона во всех участках озера приходится на конец зимы (низкий уровень озера), наиболее низкие — на весенний период (высокий уровень озера). Летом концентрации гидрокарбонатного йона значительно возрастают только у устья ручья Сулгуоя, что связано с переходом ручья преимущественно к грунтовому питанию.

Осенью в связи с осенней сменой питания ручьев Сулгуоя и Пограноя (увеличивается сток с болот), а также возрастанием объема стока концентрации гидрокарбонатного йона снижаются и в приустьевых участках озера. Значительное снижение концентраций осенью характерно и для р. Матчелицы. Однако в центральном плесе и других участках озера заметных изменений в осенний период не наблюдается.

Характерно, что зимой в восточной части озера, включая и поверхностный слой воды в середине озера, концентрации гидрокарбонатного йона не отличаются от осенних и близки между собой. Но в придонном слое центрального плеса в течение зимы они заметно возрастают за счет растворения из донных отложений в результате накопления большого количества углекислоты.

В северной, западной и юго-западной частях озера зимой концентрации гидрокарбонатного йона резко возрастают и в поверхностных

слоях воды (рис. 1). То же наблюдается в районе впадения ручьев Пограноя и Сулгуоя, где концентрации к концу марта достигают своих максимальных годовых величин (54,3 мг/л).

Распределение гидрокарбонатного йона в зимний период подтверждает высказанное предположение о том, что восточная часть озера зимой несколько обособлена от западной. Вследствие более энергичного водообмена в восточной части наблюдается равномерное распределение гидрокарбонатного йона, без заметного накопления в течение зимы. Концентрации гидрокарбонатного йона в р. Матчелице те же, что и в озере.

В западной части озера, включая северную и юго-западную, благодаря меньшему расходу ручьев Сулгуоя и Пограноя водообмен более ограничен. В то же время ручьи несут воду со сравнительно высоким содержанием гидрокарбонатного йона. В конце марта 1953 г. в ручье Пограноя концентрации его составляли 51,6 мг/л, а в ручье Сулгуоя — 56,8 мг/л. Эти воды, медленно распространяясь по северо-западной зоне, направляются также в р. Миккельскую. С этим частично, повидимому, связано возрастание концентраций гидрокарбонатного йона зимой в северной и северо-западной частях озера. Безусловно, здесь также имеет место и растворение гидрокарбонатного йона из донных отложений по мере накопления углекислоты.

В Крошнозере резких различий в концентрациях гидрокарбонатного йона по площади не наблюдается. В некоторые периоды года несколько выделяются по его содержанию участки, прилегающие к устьям рек и ручьев. Например, приустьевые участки у ручья Лебреоя и р. Холмы во второй половине зимы характеризуются более высокими концентрациями по сравнению с поверхностными слоями центральных станций. И наоборот, в начале лета в приустьевых участках озера у р. Холмы и ручья Явиеноя, которые несут в это время воды с низким содержанием гидрокарбонатного йона и характеризуются повышенным объемом стока, его концентрации имеют более низкие значения по сравнению с водой всего озера (14,6—15,2 мг/л против 18,3—21,4 мг/л в собственно озерной воде).

В приустьевых участках озера значительно резче выступают сезонные колебания в содержании гидрокарбонатного йона, в то время как в самом озере эти колебания невелики.

Как правило, наиболее низкие концентрации гидрокарбонатного йона в Крошнозере отмечаются в первой половине лета (май, июнь) и осенью (октябрь). Наиболее высокие концентрации в поверхностных слоях наблюдались в период весенней циркуляции, когда зимние придонные запасы выносятся на поверхность, и распределение гидрокарбонатного йона по глубине становится почти однородным.

В вертикальном распределении гидрокарбонатного йона в Крошнозере отчетливо выражена стратификация, заметно сглаживающаяся в периоды циркуляции и возрастающая с установлением температурной слоистости. В глубинных слоях благодаря растворению карбонатных соединений из донных отложений наиболее высокие концентрации определены в зимний период с максимумом к концу подледного состояния. В поверхностных же слоях глубоководных станций до конца зимы сохраняются осенние концентрации.

Сульфатный и хлоридный йоны по сравнению с гидрокарбонатным представлены в незначительном количестве. В Миккельском озере сульфатного и хлоридного йона в эквивалентных единицах в 7 раз меньше, чем гидрокарбонатного; в Крошнозере сульфатного йона в 5 раз меньше, хлоридный же составляет от 0,1 до 0,05 мг-экв гидрокарбонатного йона.

Ко второй половине лета по мере падения уровня воды концентрации сульфатов несколько возрастают. Разница в концентрациях сульфатов между поверхностными и придонными слоями незначительная.

Концентрации кальция в центральном плесе Миккельского озера колебались в течение года в пределах 3,6—5,1 мг/л. В Крошнозере эти пределы несколько ниже: от 3,1 до 4,3 мг/л.

В содержании кальция в течение года намечается два максимума, приуроченные к наименьшим уровням воды (конец зимы и середина лета), и два минимума, связанные с осенним и весенним паводками. Максимальные концентрации характерны для конца зимнего периода.

Сумма минеральных веществ в конце мая в центральном плесе Миккельского озера составляла около 0,72 мг-экв/л, а в Крошнозере в тот же период — около 0,64 мг-экв/л. Таким образом, в обоих озерах минерализация не превышает 30 мг/л. При наименьших уровнях воды (середина лета и вторая половина зимы) минерализация несколько возрастает.

Однако и при максимальных концентрациях главных ионов минерализация воды озер Миккельского и Крошнозера невысокая и не выходит за пределы концентраций, встреченных до сих пор среди озер южной и средней Карелии (табл. 2), хотя она несколько выше, чем в более северных водоемах и реках республики (Слободчиков, 1935, 1946; Малашенко, 1937).

Таблица 2

Концентрации Ca^{++} и HCO_3^- в некоторых озерах южной Карелии

Объект	Дата исследования	Горизонт	Ca^{++}		HCO_3^-		Примечание
			мг/л	мг-экв	мг/л	мг-экв	
Петрозаводская губа	29.III—1948 г.	Поверхностный	4,39	0,22	24,4	0,40	По Баранову (1951)
Логозеро	2.VII—1947 г.	"	—	—	18,9	0,31	"
Сямозеро	—	"	3,78	0,19	15,8	0,26	"
Шотозеро	14.VII—1947 г.	"	5,00	0,25	10,9	0,18	"
Кончезеро	1.VII—1926 г.	"	—	—	48,2	0,79	По Зеленовой-Перфильевой (1927)
Малая Линдаламба	4.VI—1952 г.	"	6,25	0,31	29,6	0,49	По нашим исследованиям
Миккельское озеро (центральный плес)	31.III—1953 г.	"	5,13	0,26	18,9	0,31	"
	23.V—1953 г.	"	3,65	0,18	17,1	0,28	"
	25.VII—1953 г.	"	4,15	0,21	20,1	0,33	"
	16.X—1953 г.	"	3,72	0,18	18,9	0,31	"
Крошнозеро	3.VI—1953 г.	"	3,79	0,19	15,9	0,26	"
	3.VI—1953 г.	У дна	3,76	0,19	18,3	0,30	"
	4.VIII—1953 г.	Поверхностный	3,87	0,19	19,5	0,32	"
	26.X—1953 г.	"	3,43	0,17	15,9	0,26	"
	2.IV—1953 г.	"	4,27	0,21	—	—	"

Сравнение концентраций преобладающих ионов озер Миккельского и Крошнозера с рядом других озер дает основание предполагать, что ряд отличительных особенностей изучаемых озер (обильное развитие макрофлоры и фитопланктона и связанное с этим значительное перенасыщение летом воды кислородом, исчезновение углекислоты, высокие значения рН) не является следствием существующей минерализации воды, а, как это будет видно далее, обуславливается количественными показателями некоторых биогенных элементов.

БИОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Кремний. Кремний в озерах Миккельском и Крошнозере изучался только в летнее время (конец мая, июнь и август). В Миккельском озере концентрации кремния летом находились в пределах 0,6—5,8 мг/л Si. Наиболее высокие концентрации его определены вблизи устьев ручьев Сулгуоя и Пограноя, наиболее низкие — в восточном и северном прибрежных участках.

Общей закономерности в динамике кремния в пределах всего озера в течение лета установить не удалось. В приустьевых участках озера, ручьях и речках отмечается постепенное возрастание концентраций кремния к концу лета, что, повидимому, находится в связи с возрастанием в течение лета доли грунтового питания ручьев и рек. Несколько возрастает содержание кремния и в восточной прибрежной зоне. На центральной станции к концу лета, наоборот, концентрации его несколько падают. В распределении по вертикали намечается слабо выраженная тенденция снижения концентраций кремния ко дну.

В Крошнозере концентрации кремния в летний период находились в пределах 1,7—4,6 мг/л Si.

В распределении по площади озера отмечается некоторое превышение концентраций кремния в северной и средней частях над концентрациями юго-восточной части.

На основании полученных в течение лета данных по кремнию следует сказать, что недостатка в кремнии в изучаемых озерах нет. Как известно из работ К. А. Гусевой (1952), даже для таких, наиболее нуждающихся в кремнии организмов, как диатомовые, наилучшими концентрациями являются около 0,6 мг/л.

Железо. В Миккельском озере за весь период исследования концентрации общего железа находились в пределах 0,14—2,12 мг/л. Распределение его по площади озера неравномерное. В центральном плесе, восточной прибрежной зоне, в приустьевом участке у р. Матчелицы и у истока р. Миккельской концентрации железа не превышают 0,81 мг/л. В северной и северо-западной прибрежных зонах они доходят до 1,50 мг/л. Наконец, в приустьевых участках озера у ручьев Пограноя и Сулгуоя содержание железа колеблется в течение года от 0,64 до 2,12 мг/л.

Наиболее высокие концентрации железа в основном плесе Миккельского озера наблюдались в весенний паводковый период. Так, в 1954 г. через 6—8 дней после освобождения озера ото льда концентрации железа в центральном плесе находились в пределах 0,53—0,81 мг/л. Удержанию этих количеств железа в растворе в это время способствуют наличие углекислоты, почти нейтральная реакция воды и преимущественно гумусный характер органического вещества.

В течение июня и июля по мере сокращения поверхностного стока и некоторого выпадения гуминовых соединений, а также благодаря исчезновению углекислоты и резкому подщелачиванию воды (рН=9,20)

концентрации железа начинают падать, давая в конце июля летний минимум (0,30—0,38 мг/л). К концу лета концентрации железа снова начинают возрастать (до 0,42—0,60 мг/л), что связано с увеличением поверхностного стока, обогащающего воду озеро органическими веществами и железом. Характерно, что к середине лета при минимальных концентрациях общего железа оно представлено преимущественно закисной формой.

К концу лета процент окисного железа возрастает до 70—85%. Осеннее охлаждение озера и глубокая длительная циркуляция водной массы способствуют частичному снижению содержания железа в растворе за счет его выпадения в форме гидрата окиси железа. Оставшееся в растворе железо представлено почти целиком окисной формой.

Выпадение железа из раствора происходит и в течение первой половины зимы. Этому способствуют благоприятные газовые условия. Кроме того, зимой прекращается подток почвенных вод, обогащающих озеро железом. Поэтому в первой половине зимы в Миккельском озере в поверхностном слое воды наблюдаются минимальные в годовом цикле концентрации железа (0,21—0,34 мг/л). Однако на максимальной глубине — в центре озера — к середине зимы в придонных слоях концентрации железа начинают возрастать за счет обратного растворения из илов. Процесс растворения связан с повышением содержания углекислоты и снижением концентраций кислорода. Во второй половине зимы по мере дальнейшего обеднения воды кислородом и повышением концентраций углекислоты переход железа из илов в воду усиливается. Путем диффузии оно проникает и в более верхние слои воды.

Но все же в Миккельском озере процесс выпадения железа и обратного растворения из илов совершается в довольно узких пределах, поэтому ни полного исчезновения его из раствора, ни заметного накопления в озере не происходит.

В участках с повышенными концентрациями железа сезонная динамика его несколько иная, чем в центральном плесе. В северной и северо-западной прибрежных зонах июльские концентрации являются минимальными в годовом цикле. Зимний минимум отсутствует. Уже в первой половине зимы отмечается возрастание концентраций железа. Во второй половине зимы в связи с большим дефицитом в этой зоне кислорода и значительным накоплением углекислоты содержание железа резко возрастает (за счет растворения из донных отложений), образуя годовой максимум в пределах этого участка.

Совершенно обособленным по содержанию и сезонной динамике железа, как и по другим показателям, является участок озера у ручья Сулгуоя. При более высоких общих концентрациях максимальные их значения совпадают по времени с минимальными концентрациями в центральном плесе. Максимум в годовом цикле отмечается в середине лета, когда ручей Сулгуоя переходит к преимущественно грунтовому питанию.

В заключение следует сказать, что в центральном плесе и восточной части Миккельского озера в течение всего года концентрации железа являются благоприятными для развития первичной продукции. Участки озера вблизи ручьев Пограноя и Сулгуоя в периоды максимальных концентраций железа, обычно совпадающие с наиболее тяжелыми газовыми условиями, не могут считаться благоприятными для жизни. Для участка озера вблизи ручья Сулгуоя этими периодами считаются вторая половина лета и отчасти конец зимы. Для участка у ручья Пограноя менее благоприятными являются паводковые периоды.

В Крошнозере в течение года концентрации железа колебались в пределах 0,12—1,83 мг/л. При этом крайний верхний предел встречен

только в некоторых приустьевых участках. В собственно озерной воде концентрации общего железа в верхних слоях воды не превышали $0,69 \text{ мг/л}$, а в придонных в зимнее время они поднимались до $0,98-1,20 \text{ мг/л}$.

Реки и ручьи, впадающие в озеро, как правило, несут воду, более богатую железом, чем собственно озерная вода. Так, в р. Холме за время исследования концентрации железа составляли от $0,74 \text{ мг/л}$ в конце мая до $1,96 \text{ мг/л}$ в августе; в ручье Лебреоя — от $0,61 \text{ мг/л}$ в конце мая до $1,35 \text{ мг/л}$ в августе. Еще более высокие концентрации железа определены в ручьях Явиеноя, Шогаоя и особенно в Мельничном (в начале апреля 1953 г. — $5,13 \text{ мг/л}$).

Заметно богаче железом по сравнению с крошнозерской водой также вода ламбы, сообщающейся с юго-западным концом Крошнозера. Естественно поэтому, что участки озера, примыкающие к устьям рек и ручьев, несколько богаче железом по сравнению с основной массой озерной воды. Южная часть озера, в которую поступают богатые железом воды ламбы и ручья Мельничного, в периоды повышенных расходов их (весной) богаче железом, чем средняя и северная части озера.

Сезонная динамика железа в Крошнозере близка к таковой в Миккельском озере.

Минеральный азот и фосфор. Минеральный азот и фосфор играют крайне важную роль в водоеме как элементы, входящие в состав белка протоплазмы клеток водорослей. Они, как известно, чаще всего являются факторами, лимитирующими развитие водорослей.

Минеральный азот в озерах Миккельском и Крошнозере представлен в форме аммонийного, нитритного и нитратного. Однако нитритный азот, как очень нестойкая форма, встречен в очень небольших количествах ($0,001-0,002 \text{ мг/л NO}_2$) в некоторых пробах приустьевых участков озера и в реках в периоды наибольшего застоя воды.

Аммонийный азот в озерах Миккельском и Крошнозере присутствовал повсеместно в течение всего периода исследований. В Миккельском озере его концентрации находились в пределах $0,05-0,50 \text{ мг/л NH}_4$, в Крошнозере — в пределах $0,01-0,70 \text{ мг/л}$.

В сезонном распределении аммонийного азота наблюдается определенная закономерность (рис. 4).

В Миккельском озере наиболее низкие концентрации аммонийного азота ($0,05-0,10 \text{ мг/л}$) определены в период полной весенней циркуляции. По мере прогревания озера и усиления процессов разложения отмершей растительности концентрации его возрастают, образуя максимум в июле и августе.

Некоторое исключение представляют северный и восточный прибрежные участки, где в конце июля концентрации аммонийного азота составляли $0,10-0,15 \text{ мг/л}$. Повидимому, в этих зонах более интенсивно шел процесс нитрификации, и возможно, в большем

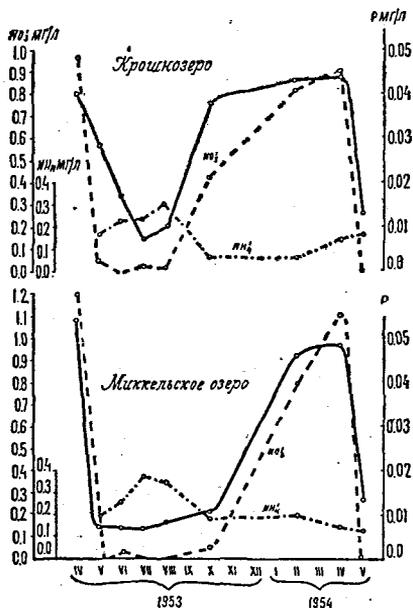


Рис. 4. Сезонные изменения концентраций P , NH_4 и NO_3 в Миккельском озере и Крошнозере (средние данные).

количестве, чем в других участках озера, азот в форме аммонийного потребляется развивающимся фитопланктоном. Известно, что при недостатке нитратов водорослями успешно воспринимается аммонийный азот. Судя по газовому состоянию и величине рН, в восточной прибрежной зоне можно предполагать более интенсивный фотосинтез, чем в центральном плесе, поэтому и потребление неорганических соединений азота здесь выше.

Осенью (к середине октября) концентрации аммонийного азота на большей части площади Миккельского озера снижаются в два раза и более по сравнению с летними.

Зимой, в противоположность описываемому по ряду озер значительному возрастанию концентраций аммонийного азота (оз. Черное в Косине, Кузнецов, 1952; ряд исследованных нами в 1950 и 1951 гг. ламб Петровского района КАССР и др.), в Миккельском озере только в первой половине зимы на некоторых станциях наблюдается крайне небольшое повышение его концентраций. Во второй половине зимы содержание аммонийного азота заметно снижается, приближаясь к минимальным для всего года концентрациям (0,08—0,10 мг/л). Наиболее высокие концентрации зимой характерны для северного и западного прибрежных участков (0,20—0,35 мг/л NH_4).

Подобная картина в распределении аммонийного азота наблюдалась и в Крошнозере. Хотя весенние концентрации его в Крошнозере несколько выше, чем в Миккельском, в течение лета в нем также наблюдается накопление аммонийного азота с образованием к концу лета максимума в годовом цикле. Обусловливается оно интенсивным разложением создающегося в течение лета запаса нестойкого органического вещества. Придонные слои воды летом богаче аммонийным азотом, чем поверхностные.

Более высокие концентрации и более резкая стратификация летом характерны для южной части озера. Высокие концентрации аммонийного азота, как правило, были и в приустьевых участках озера.

В отличие от Миккельского озера в Крошнозере минимально низкие концентрации аммонийного азота были определены не весной, а осенью. В октябре по всему озеру концентрации не превышали 0,10 мг/л, а большей частью выражались в 0,02—0,05 мг/л. В течение первой половины зимы на большей части площади озера концентрации аммонийного азота остаются предельно низкими. Только в северной мелководной части, некоторых прибрежных зонах и на большой глубине в участке озера между деревнями Котчура — Ершнаволок — Школьная губа концентрации NH_4 в первой половине зимы повышаются до 0,18—0,20 мг/л. К концу зимы на мелководных участках они несколько падают, на глубоководных незначительно повышаются. Распределение по глубине равномерное.

Отсутствие накопления аммонийного азота в течение зимы связано с тем, что параллельно процессу аммонификации в этих озерах идет процесс нитрификации. Как активная реакция, так и газовые условия являются благоприятными для протекания данного процесса. Как видно из рис. 4, за зимний период происходит большое накопление нитратов. При этом в конце зимы определены максимально высокие в годовом цикле концентрации нитратов (0,90—1,75 мг/л в Миккельском озере и 0,75—1,25 мг/л NO_3 в Крошнозере). Однако в северном и западном прибрежных участках Миккельского озера, где зимой были отмечены наиболее высокие концентрации аммонийного азота, содержание нитратов оказалось крайне низким (0,06—0,16 мг/л NO_3). В этих участках процесс нитрификации был угнетен вследствие неблагоприятных кислородных условий и более низкой величины рН по сравнению с другими участками озера.

Наиболее энергично процессы аммонификации и нитрификации в Миккельском озере протекают в первой половине подледного состояния озера. Примерно $\frac{2}{3}$ запаса нитратов, установленного в конце зимы, накапливается уже к началу февраля. Незадолго до ледостава нитраты в озере находились только в следах.

В Крошнозере в отличие от Миккельского накопление нитратов уже отмечается осенью. В середине октября при очень низких концентрациях аммонийного азота концентрации нитратов составляли от 0,25 до 0,60 мг/л (рис. 4.). Зимой нитрификация продолжается; к середине зимы в Крошнозере, так же как и в Миккельском, она в основном заканчивается. В начале февраля концентрации нитратов составляли 0,70—0,95 мг/л, а к концу зимы возрастают до 0,90—1,25 мг/л. Распределение нитратов по площади и глубине в зимнее время почти однородное.

Динамика аммонийного и нитратного азота в Миккельском озере и Крошнозере свидетельствует о том, что минерализация органического вещества в этих озерах в основном завершается в первой половине подледного периода. Это подтверждается, как увидим далее, динамикой фосфатов и органического вещества.

В озерах Миккельском и Крошнозере в конце зимы ярко выраженного процесса денитрификации, так характерного для некоторых евтрофных озер, не наблюдалось.

Концентрации нитратов, создающиеся в зимний период в озерах Миккельском и Крошнозере, с полным основанием можно считать достаточно высокими, близкими к концентрациям их в таких высокопродуктивных озерах, как оз. Белое (в Косино), Рыбинское водохранилище и др. По данным С. И. Кузнецова (1934), в оз. Белом максимальная концентрация нитратов, относящаяся к концу января, составляет 0,523 мг/л N (2,32 мг/л NO'_3). В Рыбинском водохранилище содержание нитратов в конце марта и начале апреля 1954 г. составляло 0,22 мг/л N (0,97 мг/л NO'_3) в поверхностном слое воды и 0,32 мг/л N (1,4 мг/л NO'_3) в придонном слое (Кудрявцев, 1950).

В озерах Карелии столь высокие концентрации нитратов до сих пор не были встречены. Например, в 1950—1951 гг. в ряде ламб Петровского района (М. Линдаламба, Коверламба и др.) максимальные концентрации нитратов не превышали 0,3 мг/л NO'_3 .

Сравнительно большие запасы минерального азота, в частности нитратов, создающиеся к концу зимы, являются одним из факторов, обуславливающих раннюю вспышку в развитии в озерах фитопланктона. Поэтому накопленные в течение зимы количества нитратов после вскрытия льда очень быстро исчезают. В 1954 г. в Миккельском озере через 6—8 дней после освобождения ото льда, а в Крошнозере через 10—14 дней нитраты практически отсутствовали и только в некоторых пробах находились в следах (главным образом в придонных слоях воды). В 1953 г. неделей позже (конец мая — начало июня) наблюдалась та же картина. Только в южной части Крошнозера, где вследствие низких температур фитопланктон был еще слабо развит, концентрации нитратов составляли 0,10—0,16 мг/л.

В течение летних месяцев в противоположность аммонийному азоту нитраты в обоих озерах отсутствовали или находились в следах (не выше 0,05 мг/л NO'_3).

Однако в некоторых ручьях и реках нитраты присутствовали и летом. В пределах 0,07—0,10 мг/л они были определены в р. Матчелище, в пределах 0,15—0,40 мг/л — в ручье Сулгуоя. Повидимому, наличие нитратов в данных участках связано с их значительным поступле-

нием с грунтовыми водами. В течение всего лета нитраты присутствовали также в притоках Крошнозера (ручей Лебреоя и р. Холма).

Несмотря на то, что в собственно озерной воде обоих озер летом нитраты отсутствовали или отмечались только их следы, развитие фитопланктона в течение лета было довольно высоким (наблюдалось почти непрерывное цветение воды). Это связано, повидимому, с ускоренным круговоротом веществ в этих озерах, заключающимся в быстрой минерализации образующегося органического вещества и непрерывном использовании освобождающихся продуктов минерализации, чему благоприятствуют хорошая прогреваемость данных озер, характер органического вещества и донных отложений (серозеленые илы). С прекращением развития водорослей (вследствие охлаждения воды, а зимой благодаря неблагоприятным световым условиям) в этих озерах создаются запасы нитратов.

Высокое развитие первичной продукции в озерах Миккельском и Крошнозере обуславливается также довольно значительными запасами фосфатов. Концентрации фосфатов в течение года в Миккельском озере находились в пределах 0,005—0,078 мг/л, в Крошнозере — в пределах 0,006—0,063 мг/л Р.

Подобно нитратам, наибольшее накопление фосфатов происходит в подледный период. Максимально высокие концентрации отмечены в конце зимы. Однако основное их количество, как и нитратов, появляется в первой половине зимы. При этом в Крошнозере в отличие от Миккельского озера фосфаты уже в значительном количестве определены осенью (0,028—0,054 мг/л), а в придонных слоях — и в конце лета (до 0,063 мг/л). В течение зимы концентрации фосфатов возрастают крайне незначительно (рис. 4).

В Миккельском озере как в конце лета, так и в октябре концентрации фосфатов составляли 0,008—0,010 мг/л, и только в подледный период они начинают возрастать.

Таким образом, в Крошнозере основная минерализация органических веществ заканчивается значительно раньше, чем в Миккельском (о чем свидетельствуют и данные по нитратам). Однако конечные концентрации фосфатов, создающиеся в обоих озерах к началу вегетационного периода, очень близки. Так, если в Миккельском озере концентрации фосфатов в конце зимы составляли 0,036—0,061 мг/л Р, то в Крошнозере — 0,031—0,057 мг/л Р при очень незначительном превышении концентраций в южной части озера над концентрациями в северной и средней частях и небольших колебаниях по вертикали.

В Миккельском озере наиболее высокие концентрации фосфатов (0,054—0,061 мг/л Р) зимой распределены в восточной прибрежной зоне, в северо-восточной и северной частях центрального плеса.

Зимние концентрации фосфатов в озерах Миккельском и Крошнозере не уступают таковым в евтрофном оз. Белом (в Косино), где, по данным С. И. Кузнецова (1934), в начале февраля фосфаты содержались в количестве 0,029—0,068 мг/л Р, а в середине марта в количестве 0,016—0,026 мг/л. По сравнению с рядом озер Карелии накопление фосфатов в озерах Миккельском и Крошнозере является значительно более высоким. По данным И. В. Баранова (1951), в Сязозере в начале апреля 1948 г. концентрации фосфатов не превышали 0,015—0,020 мг/л Р₂ О₅ (0,009 мг/л Р).

В наиболее евтрофированной М. Линдаламбе Петровского района республики, по нашим данным (1953 г.), максимальная концентрация фосфатов составляла 0,023 мг/л Р.

Зимние запасы фосфатов уже в первую декаду после освобождения озера ото льда в значительной мере используются развивающимся

фитопланктоном. В Миккельском озере в 1954 г. на 6—8 день после вскрытия концентрации фосфатов во всем озере снизились до 0,010—0,016 мг/л P. В 1953 г. в конце мая фосфаты находились в предельно низких для озера концентрациях (0,005—0,011 мг/л). Отчасти концентрации фосфатов, как и других веществ, весной снижаются за счет разбавления озерной воды талыми водами. В течение всего лета определяются примерно такие же концентрации фосфатов (рис. 4). В августе отмечается небольшое возрастание концентраций фосфатов в придонных слоях (до 0,018 мг/л).

Характерно, что в приустьевых участках озера у ручьев Сулгуоя и Пограноя, а также р. Матчелицы летом сохранялись более высокие концентрации фосфатов, чем в центральном плесе озера. В указанные участки озера фосфаты, как и нитраты, поступают в значительном количестве с грунтовыми водами. Ручьи имеют существенное значение в обогащении всего озера фосфатами. У ручья Пограноя высокие концентрации фосфатов отчасти сохраняются вследствие их малой доступности для водорослей, так как этот участок богат гуминовыми веществами.

Летние концентрации фосфатов в Крошнозере заметно выше, чем в Миккельском озере (рис. 4). В придонных слоях воды на глубоководных участках концентрации фосфатов в течение всего лета выше, чем в поверхностных слоях. Особенно разница возрастает во второй половине лета. Здесь явно выступают застойные явления, на что указывалось и при описании газового режима.

В связи с тем, что в южной части озера к концу лета придонные слои оказываются более обогащенными фосфатами по сравнению с северной и средней частями, где застойные явления слабее выражены или отсутствуют (северное мелководье), в периоды частичных и полных циркуляций южная часть богаче фосфатами.

Благодаря застойным явлениям, развивающимся во второй половине лета, в Крошнозере осенние концентрации фосфатов много выше по сравнению с Миккельским озером.

Следует отметить, что притоки Крошнозера, как и Миккельского озера, летом также богаче фосфатами, чем собственно озерная вода. В ручье Лебреоя в течение лета содержание фосфатов колебалось в пределах 0,032—0,042 мг/л, а в р. Холме—в пределах 0,20—0,41 мг/л P.

Обращает на себя внимание тот факт, что в Миккельском озере и Крошнозере концентрации фосфатов не опускались ниже 0,005—0,006 мг/л. Повидимому, это является предельной для данных озер величиной, до которой фосфаты способны усваиваться растениями. Оставшаяся часть фосфатов находится в тесной адсорбционной связи с органическим веществом и является недоступной для восприятия. Концентрации органических веществ в этих озерах достаточно велики и дают основание сделать такое предположение.

Низкие концентрации фосфатов в течение открытого периода в этих озерах являются следствием их непрерывного потребления. Возобновление же их происходит энергично и непрерывно.

Обобщая данные по распределению минеральных соединений азота и фосфора в озерах Миккельском и Крошнозере, необходимо подчеркнуть следующее:

1. Повышенное накопление в течение зимы запаса фосфатов и нитратов отличает эти озера от других озер Карелии.

2. Значительное накопление минеральных соединений фосфора и азота свидетельствует о повышенном круговороте веществ в этих озерах и ускоренном процессе минерализации органических веществ.

3. Это обстоятельство благоприятно сказывается на развитии водной микро- и макрофлоры. В результате значительного запаса питательных веществ к концу зимы в озерах Миккельском и Крошнозере рано и бурно начинается развитие фитопланктона, которое продолжается в течение всего лета, обуславливая на протяжении поздней весны и лета отчетливое цветение воды (явление редкое для других озер республики).

4. Высокое развитие фитопланктона и водной растительности летом в свою очередь обуславливает перенасыщенность воды кислородом, полное потребление углекислоты, высокий pH и другие факторы, по которым эти озера отличаются от других озер Карелии.

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО

Вода озер Миккельского и Крошнозера сравнительно богата органическим веществом. Однако Крошнозеро по содержанию органического вещества несколько уступает Миккельскому озеру. В основном плесе Миккельского озера перманганатная окисляемость колебалась в течение года в пределах 10,6—17,9 мг/л O_2 , а бихроматная в пределах 24,7—49,0 мг/л O_2 . В Крошнозере за тот же период времени перманганатная окисляемость находилась в пределах 8,8—15,2 мг/л O_2 , а бихроматная в пределах 23,7—49,9 мг/л O_2 .

Небольшое различие в содержании органического вещества в Крошнозере по сравнению с Миккельским озером относится главным образом к летнему и осеннему периодам. Более высокие концентрации органического вещества в Миккельском озере создаются, повидимому, за счет широкого развития высшей водной растительности. Цветность воды в обоих озерах близка и в центральных частях в течение года колеблется преимущественно в пределах 40—90°. В отдельных участках, связанных главным образом с притоками, значения цветности много выше.

По содержанию и характеру органического вещества в Миккельском озере можно выделить три отличающихся между собой участка.

Наиболее высокими концентрациями органического вещества характеризуется участок озера, примыкающий к устью ручья Пограноя. Цветность воды здесь доходит до 214°. Перманганатная окисляемость колеблется между 11,7—30,1 мг/л O_2 с явным преобладанием в течение года величин, близких к максимальной границе. По характеру органического вещества в этой зоне преобладают вещества типа гуминовых соединений торфяного и растительного происхождения, так как отношение цветности к перманганатной окисляемости почти в течение всего года выше 6 (до 13), а перманганатная окисляемость составляет от 35 до 54% от бихроматной.

Только в середине лета в этом участке снижается общее содержание органических веществ и меняется его качество. Цветность падает до 60—85°, перманганатная окисляемость до 12,5—14,4 мг/л O_2 . Обуславливается это тем, что к середине лета сокращается болотное питание ручья Пограноя. Находящиеся в воде приустьевого участка окрашенные вещества (соединения фульвокислот) в течение лета в значительной мере выпадают. На эту способность их выпадения указывают П. П. Воронков и О. К. Соколова (1951), что подтверждается также нашими наблюдениями на гумифицированных ламбах.

К оставшимся в растворе органическим веществам присоединяются нестойкие и малоокрашенные органические вещества планктонного происхождения. Наиболее богат органическим веществом этот участок в паводковые периоды.

По содержанию и характеру органического вещества к участку у ручья Пограноя близка вся прибрежная зона к северо-востоку (до мыса Хопуннэкка).

Весь центральный плес озера (включая приустьевой участок р. Матчелицы и участок у истока р. Миккельской), а также отчасти восточная и северная прибрежные зоны характеризуются более низкими концентрациями органического вещества. Цветность воды в центральном плесе колеблется в течение года в пределах $34-95^\circ$, перманганатная окисляемость в пределах $10,6-17,9$ мг/л O_2 , бихроматная окисляемость — от $24,7$ до $49,0$ мг/л O_2 . В северной и восточной прибрежных зонах в определенные сезоны (весна, конец зимы) значения цветности и окисляемости выше указанных для центрального плеса.

Весьма характерно, что колебания цветности и бихроматной окисляемости значительно больше, чем колебания перманганатной окисляемости. Это особенно становится наглядным, если сравнить колебания этих показателей на отдельных станциях. Так, на центральной станции с мая 1953 г. по май 1954 г. в поверхностном слое цветность изменялась от 39 до 95° , бихроматная окисляемость от $24,7$ до $46,1$, а перманганатная окисляемость только в пределах $11,6-14,0$ мг/л O_2 .

Характерно также, что максимальные величины цветности не совпадают по времени с максимальными величинами окисляемостей, а во второй половине лета даже наблюдается обратная картина: минимальной в году цветности соответствуют наиболее высокие значения окисляемостей. Некоторое несоответствие наблюдается и в величинах перманганатной и бихроматной окисляемостей.

Эти факты свидетельствуют о том, что в Миккельском озере наряду со значительными колебаниями общего количества органического вещества заметно меняется в течение года его качество.

Наинизшие концентрации органического вещества в основном плесе озера падают на зимний период, главным образом на конец зимы. Наиболее высокое содержание органических веществ определено во второй половине лета (по данным перманганатной и бихроматной окисляемостей).

Однако наивысшие значения цветности приходятся на весенний период и первую половину лета; сравнительно высокая цветность наблюдается и зимой. В середине и во второй половине лета отмечены минимально низкие значения цветности.

Интерес представляет изменение состава органического вещества в течение года.

В весенний открытый период цветность воды, а также отношение цветности к перманганатной окисляемости ($5,0-6,0$) и отношение перманганатной окисляемости к бихроматной ($37-40\%$) показывают, что в растворе преобладает стойкое органическое вещество типа гуминовых соединений. Это преимущественно органическое вещество, стабилизировавшееся в озере к концу зимы и частично поступившее с водосборной площади вместе с паводковыми водами. Концентрации его очень немного выше зимних.

К концу июня (1953 г.) общее количество органических веществ возрастает (повышается цветность, перманганатная и бихроматная окисляемость). Обогащение органическим веществом происходит частично за счет нестойких соединений благодаря разложению обильно развивающегося фитопланктона и прошлогодней водной растительности. Благодаря последнему образуется частично и стойкое окрашенное органическое вещество (гумус растительного происхождения). Однако основное обогащение воды органическим веществом происходит за счет

гуминовых соединений, поступивших из ручья Пограноя и с заболоченных берегов. В ручье Пограноя в июне также резко возрастает цветность воды и окисляемость. Повидимому, в условиях Карелии болота оттаивают только к июню, и поэтому наибольший сток с болот происходит в июне.

К концу июля общее количество органического вещества увеличивается по сравнению с июнем (повышается значение бихроматной окисляемости), резко меняется и его качественный состав. Подток из ручья Пограноя значительно уменьшается. Органическое вещество июньского состава частично уходит из Миккельского озера через р. Миккельскую в Шотозеро, частично, повидимому, коагулирует в комплексе с железом и оседает, частично же подвергается разложению.

За этот период происходит отмирание и разложение большого количества фитопланктона, зоопланктона и водной растительности, благодаря чему в растворе обнаруживается главным образом нестойкое органическое вещество. Об этом свидетельствует резкое падение в июле цветности воды, снижение величины перманганатной окисляемости, отношения цветности к перманганатной окисляемости до 3,5—3,0 и процента перманганатной окисляемости от бихроматной до 26%. К концу лета количество автохтонного нестойкого органического вещества увеличивается. Осенью (октябрь) в центральной части озера сохраняется примерно июльский состав органического вещества (количественно и качественно).

Зимой нестойкие органические вещества, имеющиеся в растворе и поступающие при разложении водной растительности, в значительной мере минерализуются. Это подтверждается накоплением питательных солей и снижением общего количества органических веществ. Остающаяся трудно разлагающаяся часть органического вещества превращается в водный гумус. Последним и можно, как нам кажется, объяснить возрастание в течение зимы цветности воды, а также увеличение отношения цветности к перманганатной окисляемости до 5,0—6,0 и процента перманганатной окисляемости от бихроматной до 43—45.

Участок озера у ручья Сулгуоя характеризуется наиболее низким содержанием органических веществ. Перманганатная окисляемость в течение года колеблется здесь в пределах 7,5—14,0 мг/л O_2 . Более высокие значения ее определены в периоды наименьших уровней (конец июля, конец марта). Наиболее низкое значение определено в октябре. Цветность воды в этом участке не превышает 86°. Летом здесь цветность частично обуславливается железом. Минимальные значения цветности относятся не к середине лета, как в центральном плесе, а к осени и зиме.

Сезонная динамика количества и характера органического вещества в Крошнозере близка к таковой Миккельского озера.

Наиболее высокое содержание органического вещества по данным бихроматной окисляемости отмечается также во второй половине лета. При этом более богата органическим веществом вода северного мелководья (бихроматная окисляемость — 49,9 мг/л O_2). Отсюда в направлении к юго-восточному концу озера содержание органических веществ постепенно падает (в центральной части бихроматная окисляемость 42,2—43,3 мг/л O_2 , в южной — 33,2—33,7 мг/л O_2). Однако значения цветности и перманганатной окисляемости к концу лета становятся ниже, и на большинстве станций к концу августа отмечаются их наиболее низкие значения в годовом цикле. Это свидетельствует о том, что в Крошнозере, как и в Миккельском озере, к концу лета накапливается слабоокрашенное трудноподдающееся окислению перманганатом органическое вещество планктонного происхождения. Перманганатом в это время окисляется только 25—27% органического вещества.

Наиболее низкие концентрации органического вещества наблюдались в Крошнозере к концу зимы и составляли около половины летних. Как и в Миккельском озере, оставшееся здесь к концу зимы органическое вещество представляет собой преимущественно стойкие к биохимическому окислению окрашенные соединения (процент перманганатной окисляемости от бихроматной порядка 40—48, а отношение цветности к перманганатной окисляемости 6,0—6,7).

Обобщая вышеизложенное по органическому веществу озер Миккельского и Крошнозера можно сделать следующее заключение:

1. Озера Миккельское и Крошнозеро сравнительно богаты органическим веществом.

2. По своему происхождению это преимущественно вещество автотонное, т. е. образующееся непосредственно в самом озере за счет обильного развития микро-и макрофлоры.

3. Пополнение его извне происходит в значительной степени только в паводковые периоды за счет гуминовых соединений болотного стока.

4. Зимой до половины накопившегося за лето органического вещества минерализуется, и оставшаяся часть превращается в водный гумус.

5. По содержанию и характеру органического вещества Миккельское озеро и Крошнозеро носят черты евтрофированных водоемов.

ВЫВОДЫ

1. Озера Миккельское и Крошнозеро благодаря общим условиям формирования химического состава воды (расположены в одном геологическом, почвенном и климатическом районе) и связи между собой по химическому составу очень близки.

2. Имеющиеся различия обусловлены главным образом морфологическими особенностями: различными глубинами, объемом водной массы, а также различным характером берегов и притоков.

3. В пределах каждого озера выделяются отличные между собой участки. В Крошнозере неоднородность водной массы по акватории не резко выражена. Однако юго-восточная более глубокая часть в некоторые периоды несколько отличается от более мелководной северо-западной. Прибрежные зоны и особенно приустьевые участки озера также характеризуются несколько иными условиями, чем центральная часть. В периоды стагнаций в Крошнозере отмечается заметное различие водной массы по глубине.

В Миккельском озере различие отдельных участков резче выражено. Выделено пять участков: центральный плес, восточная прибрежная зона, северная и северо-западная, участок у ручья Пограноя и участок у ручья Сулгуоя. В некоторые периоды выделяется участок у р. Матчелицы. Вертикальная стратификация отдельных ингредиентов отмечается только зимой.

4. Общей чертой обоих озер является невысокая минерализация воды (до 50 мг/л). В период весеннего паводка минерализация составляет около 30 мг/л, в меженные периоды — несколько выше.

5. Преобладающим катионом йонного состава является кальций. Его концентрации в обоих озерах в течение года находятся в пределах 3,15—5,13 мг/л. В распределении кальция наблюдается два максимума, относящиеся к низкому уровню, и два минимума, связанные с паводками. Максимально высокое содержание кальция определено в конце зимы. Сезонные колебания концентраций кальция в Миккельском озере выражены резче, чем в Крошнозере.

6. Преобладающим анионом в обоих озерах является гидрокарбонатный ион. Концентрации его в центральном плесе обоих озер близки и находятся в пределах 14,64—28,68 мг/л HCO'_3 . В прибрежных зонах и особенно в приустьевых в меженные периоды эти концентрации выше: в Крошнозере они поднимались до 39,05 мг/л, в Миккельском озере — до 54,31 мг/л. Сезонные колебания концентраций гидрокарбонатного иона на станциях центральных плесов крайне невелики. В прибрежных зонах и приустьевых участках они больше. Максимальные концентрации в поверхностных слоях определены в середине лета, в придонных — в конце зимы. В этот период отмечается наиболее резкая обратная стратификация по вертикали.

7. Концентрации сульфатного и хлоридного ионов в эквивалентных единицах в 5—7 раз ниже концентраций гидрокарбонатного иона.

8. Характерной особенностью обоих озер, отличающей их от остальных исследованных водоемов Карелии, является полное исчезновение летом из воды на значительных участках озера свободной углекислоты. В растворе появляется карбонатный ион (до 4,25 мг/л). В Миккельском озере летом свободная углекислота отсутствует в центральном плесе и восточной прибрежной зоне, в Крошнозере — в прибрежных зонах и более мелководных участках центрального плеса.

Зимой в связи с интенсивно происходящими в озере биохимическими процессами углекислота накапливается в довольно больших количествах: в центральном плесе Миккельского озера до 13,7 мг/л в поверхностном слое и до 25,1 мг/л — в придонном, в прибрежных и приустьевых зонах — до 32,0 мг/л; в Крошнозере зимние концентрации углекислоты несколько ниже: до 11,8 мг/л в поверхностном слое и до 16,0 мг/л — в придонном.

9. Большие колебания в содержании свободной углекислоты (и полное потребление летом) при крайне малых колебаниях концентраций гидрокарбонатного иона обуславливают в данных озерах широкий диапазон изменения рН. Активная реакция воды в обоих озерах характеризовалась рН в пределах 6,40—9,45. В северной и северо-западной прибрежных зонах Миккельского озера в период наибольшего стока с заболоченных берегов и массового разложения отмершей надводной растительности рН падал до 5,8.

Наиболее низкие значения рН наблюдались в зимний период. В это время наиболее сглаживаются различия в величине рН между обоими озерами, а также между отдельными участками каждого озера как по площади, так и по глубине. Наиболее высокие значения рН относятся к вегетационному периоду и определены в участках с полным исчезновением углекислоты (центральный плес и восточная зона в Миккельском озере; прибрежные зоны и более мелководные участки основного плеса в Крошнозере). Центральные станции среднего и южного участков Крошнозера характеризовались нейтральной и слабощелочной реакцией. Весной и осенью активная реакция в обоих озерах колеблется около нейтральной.

10. Кислородные условия изученных озер характеризуются перенасыщением воды кислородом в некоторых участках летом и значительным дефицитом его зимой. В Миккельском озере летнее перенасыщение кислородом (до 126%) характерно для центрального плеса и восточной прибрежной зоны; в северной и северо-западной прибрежных зонах отмечается дефицит в пределах 15—48%; наиболее беден кислородом приустьевой участок у устья Сулгуоя (дефицит до 73%).

В Крошнозере перенасыщение воды кислородом наблюдалось в прибрежных зонах и северном мелководье. Концентрации кислорода

падают с северо-запада на юго-восток и с прибрежных участков к центру.

Зимой восточная часть Миккельского озера богата кислородом (дефицит у дна не превышает 40%); северо-западная и западная части бедны кислородом (в поверхностных слоях насыщение падает до 8%, в придонных — до 8—6%) и неблагоприятны для зимовки рыб.

Крошнозеро зимой богаче кислородом, чем Миккельское озеро: насыщение в поверхностных слоях не ниже 74%, в придонных — 33—16%; заморных явлений не наблюдается даже в ямах.

Наибольшие абсолютные концентрации кислорода и наибольшая однородность его распределения в обоих озерах наблюдались в период весенней циркуляции. Распределение по глубине в Миккельском озере летом однородное, зимой наблюдается микрослоистость. В Крошнозере на глубоководных станциях стратификация имеет место зимой и летом.

11. Значительное перенасыщение воды кислородом, полное исчезновение свободной углекислоты и появление в растворе карбонатного йона, рН до 9,2—9,5 в озерах Миккельском и Крошнозере являются следствием высокого развития фитопланктона и погруженной водной растительности. В обоих озерах в течение лета наблюдалось почти непрерывное цветение воды (явление редкое для других озер Карелии).

12. Высокое развитие фитопланктона и водной растительности в свою очередь обусловлено повышенными по сравнению с другими озерами Карелии запасами минерального азота и фосфора, создающимися к началу вегетационного периода.

13. Минеральный азот в этих озерах представлен аммонийным и нитратным. Летом в растворе азот представлен почти целиком аммонийным. Ко второй половине лета относятся его максимальные концентрации в годовом цикле (от 0,25 до 0,70 мг/л NH_4). Нитраты летом находятся в следах или вовсе отсутствуют. В период осенней циркуляции концентрации аммонийного азота резко падают и в предельно низких концентрациях сохраняются в течение зимы и весны (0,10—0,25 мг/л). Нитраты, появляясь в осенний период, энергично накапливаются в первой половине зимы (до $\frac{2}{3}$ всего зимнего запаса) и к концу зимы образуют максимум (от 0,75 до 1,75 мг/л NO_3). В Крошнозере осенние концентрации нитратов значительно выше, чем в Миккельском озере.

14. Фосфаты, подобно нитратам, в летний период находятся в минимуме, хотя полностью из воды не исчезают. Предельно низкими концентрациями фосфатов в изучаемых озерах являлись 0,005—0,006 мг/л. В Крошнозере летние концентрации фосфатов несколько выше, чем в Миккельском. Более высокие концентрации фосфатов в Крошнозере появляются уже к концу лета (в придонных слоях) и затем дают большой прирост в период осенней циркуляции. В течение зимы концентрации фосфатов возрастают незначительно. В Миккельском озере осенью отмечается только небольшое их повышение. Основное накопление происходит в первой половине зимы. Конечные зимние концентрации фосфатов в обоих озерах близки и находятся в пределах 0,031—0,061 мг/л P.

15. Концентрации кремния и железа в исследуемых озерах благоприятны для развития и жизни растительных и животных организмов.

16. Озера Миккельское и Крошнозеро сравнительно богаты органическим веществом. В течение года оно испытывает значительные количественные и качественные изменения. Наиболее высокие концентрации органического вещества создаются ко второй половине лета (бихроматная окисляемость возрастает до 49,9 мг/л O_2). По своему характеру это преимущественно слабоокрашенное нестойкое органи-

ческое вещество планктонного происхождения (цветность около 40°, перманганатная окисляемость составляет 23—27% от бихроматной).

Наименьшие концентрации органического вещества наблюдаются в конце зимы и ранней весной. За осенний и зимний период вследствие минерализации и частичного выпадения концентрации его уменьшаются вдвое (бихроматная окисляемость в конце марта 23—29 мг/л O₂). Оставшееся органическое вещество представляет собой окрашенные стойкие соединения — водный гумус (цветность до 90°, перманганатная окисляемость составляет 40—45% от бихроматной). Поздней весной и в начале лета вода изученных озер пополняется органическим веществом типа гуминовых соединений за счет притока из болот. В этот период наблюдается наибольшая цветность воды.

Летние концентрации органического вещества в Миккельском озере несколько выше, чем в Крошнозере.

17. Минерализация образовавшегося за лето органического вещества и накопление питательных веществ (фосфатов и нитратов) в Крошнозере завершается раньше, чем в Миккельском озере. В Крошнозере она преимущественно происходит осенью и заканчивается в первой половине зимы. В Миккельском озере весь процесс сдвинут на более поздний период. Конечные концентрации продуктов минерализации, в частности азота и фосфора, к концу зимы в обоих озерах близки.

18. Повышенное накопление питательных веществ, количество и качество органического вещества, ускоренный процесс минерализации его, высокое развитие первичной продукции (цветение воды) и связанный с ним газовый режим дают основание отнести озера Миккельское и Крошнозеро к типу евтрофированных водоемов.

ЛИТЕРАТУРА

- Баранов И. В. 1950. О нахождении евтрофных озер в КФССР. Бюллетень рыбного хозяйства КФССР, № 4. Петрозаводск.
- Баранов И. В. 1951. Биогидрохимические факторы водной среды некоторых озер бассейна р. Шуи. Ученые записки Ленингр. госунив., сер. биол. г., № 142, вып. 29. Изд. ЛГУ. Ленинград.
- Воронков П. П. и Соколова О. К. 1951. Сезонные изменения состава гумусовых веществ в водах Карельского перешейка. Тр. Гос. Гидрол. инст., вып. 33 (87). Гидрометеонздат. Ленинград.
- Гусева К. А. 1952. „Цветение воды“, его причины, прогноз и меры борьбы с ним. Тр. Всесоюзного гидробиологического об-ва, т. IV. Изд. АН СССР. М.—Л.
- Зеленкова-Перфильева М. В. 1927. К гидрохимии Кончезерской группы озер. Тр. Бородинской биол. ст., т. V. Ленинград.
- Кудрявцев Д. Д. 1950. Сравнительная характеристика гидрохимического режима водохранилищ верхней Волги: Ивановского, Угличского и Рыбинского. Тр. Биологической ст. „Борок“, т. I. Изд. АН СССР. М.—Л.
- Кузнецов С. И. 1934. Сравнительное изучение азотного, фосфорного и кислородного режима Глубокого и Белого озера. Тр. Лимнологич. ст. в Косино, вып. 17. Изд. Лимнологич. ст. в Косино. Москва.
- Кузнецов С. И. 1952. Роль микроорганизмов в круговороте веществ в озерах. Изд. АН СССР. Москва.
- Малашенко А. Г. 1937. Гидрохимический очерк озера Сегозера. Уч. зап. ЛГУ, серия биол. г., вып. 55. Изд. ЛГУ. Ленинград.
- Слободчиков Б. Я. 1935. Гидробиологический очерк озер системы реки Кемь: Верхнего, Среднего и Нижнего Куйто. Тр. Карельской научно-исследов. рыбохоз. ст., т. I. Ленинград.
- Слободчиков Б. Я. 1946. К вопросу гидрохимической классификации семожьих рек Карельского берега Белого моря. Тр. Карело-Финского отд. ВНИОРХ, вып. II. Петрозаводск.
- Фрейдлинг В. А. 1956. Гидрологическая характеристика озер Миккельского и Крошнозера (печатается в настоящем выпуске).

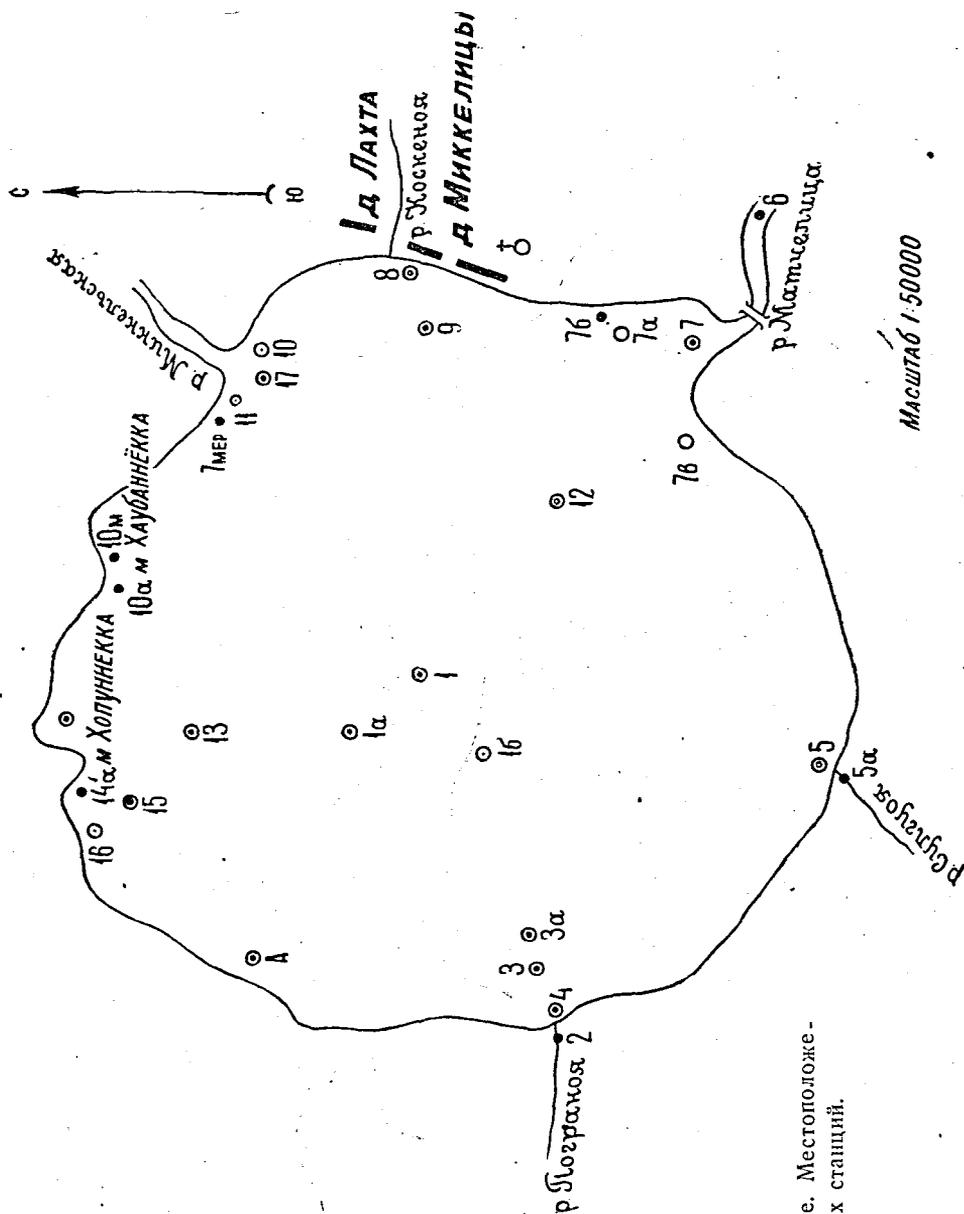


Рис. 5. Озеро Миккельское. Местоположение гидрохимических станций.

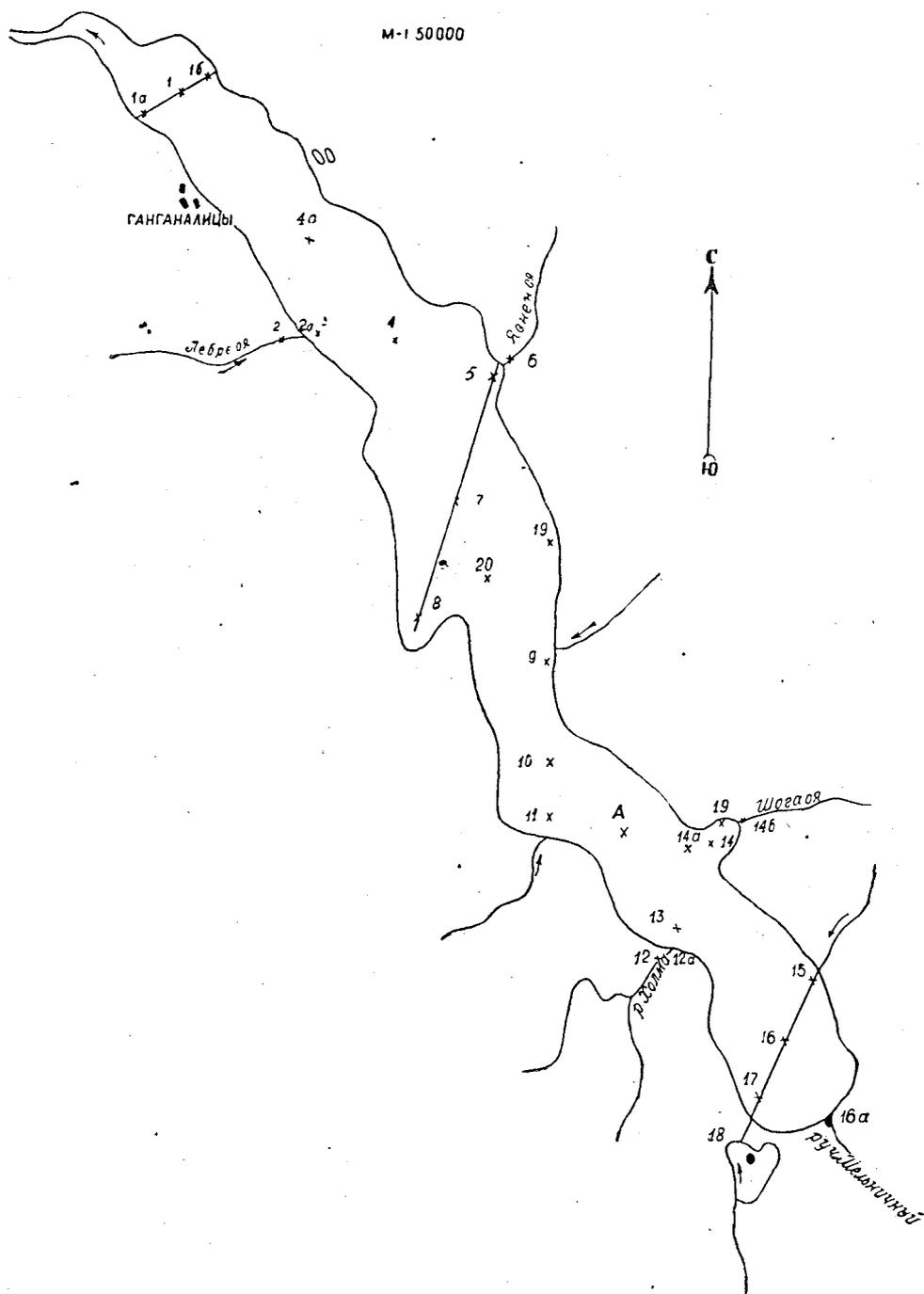


Рис. 6. Озеро Крошнозеро. Местоположение гидрохимических станций.