

УДК 574.5(282.65) (575.2) (04)

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ И ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФИТОПЛАНКТОНА ОЗЕРА ИССЫК-КУЛЬ

А.К. Тыныбеков

Сезонная динамика хлорофилла определяется в летний период в основном двумя факторами – температурой воды и количеством биогенных элементов, которое зависит от интенсивности вертикального перемешивания. В исследованиях был использован новый прибор, созданный учеными МГУ, который был применен для исследования фитопланктона озера Иссык-Куль, а также общепринятые гидробиологические методы.

Ключевые слова: фитопланктон; температура; водообмен.

А.П. Скабичевский в формулу Осфальда ввел фактор движения воды, поместив его в знаменатель, так как между скоростью погружения и движением водной массы наблюдается обратная зависимость [1]. Активность водорослей А. П. Скабичевский связывает со способностью их реагировать на свет. Эту точку зрения подтверждает Ю.А. Сорокин [2].

Г.И. Семина считает, что распределение водорослей по глубинам связано с концентрацией биогенных веществ и с глубиной положения основного термоклина [3]. И.А. Киселев отмечает, что в основе вертикального расселения планктонных водорослей лежат многие факторы – вся сложная гидродинамика водной массы, а также морфологические и физиологические приспособления организмов [4].

В настоящее время практически отсутствуют работы по вертикальному распределению фитопланктона в озере Иссык-Куль. И.А. Киселев описывает характер распределения двух основных форм водорослей открытой части озера [5]. Он отмечает, что *Volvoxococcus braunii* приурочен к поверхностным горизонтам, а *Amphiroga paludosa* var. *Issykkulensis* – к более глубоким.

Подробно вертикальное распределение фитопланктона в пелагиали Иссык-Куля была рассмотрена в 1973 году в работе [6] на примере глубоководной станции на глубине 655 м (рис. 1). В январе-феврале температура воды в верхнем 100-метровом слое наименьшая. Фитопланктон характеризуется самой низкой в году численностью и состоит из небольшого количества *Gloeocapsa minor*, *G. minima*, *Lyngbya contorta*, *Dictyosphaerium pulchellum*, *Cyclotella caspia* и видов *Oocystis*. Несколько повышенные

концентрации водорослей планктона отмечаются на глубине 5 м. С глубиной количество фитопланктона уменьшается. На глубинах свыше 100 м водоросли чаще всего встречаются единичными экземплярами.

В марте наблюдается почти полная гомотермия. Б. Орлова отмечает, что минимум тепла в Иссык-Куле приходится на февраль-март [7]. Значительно увеличивается количество фитопланктона во всем столбе воды. В верхнем 50-метровом слое численность водорослей составляет 275–572 тыс. кл./л, биомасса – от 51 до 107 мг/м³. Заметные концентрации растительного планктона наблюдаются и на больших глубинах.

Так, значительное количество фитопланктона, находящегося на глубинах свыше 100 м, объясняется попаданием его из верхнего продуцирующего слоя в нижние горизонты в результате интенсивного водообмена. В придонных слоях водорослей мало. Численность растительного планктона здесь не превышает 14 тыс. кл./л, среди них наибольшее значение принадлежит *Lyngbya contorta* (до 45%).

Для апреля характерно наличие двух температурных слоев – верхнего, до глубины 25 м, и нижнего; температура воды в верхнем слое поднимается до 7,4–7,6°, в нижнем – около 4°. Состав доминирующего комплекса и характер распределения водорослей в общих чертах такой же, как и в марте. Значительная численность водорослей отмечается в слое 50–100 м, с максимальными концентрациями на глубине 50 м (численность 878 тыс. кл./л, биомасса – 75 мг/м³). На глубинах более 300 м водорослей очень мало, в незначительном количестве здесь регистрируются *Gloeocapsa minor* и *Lyngbya contorta*.

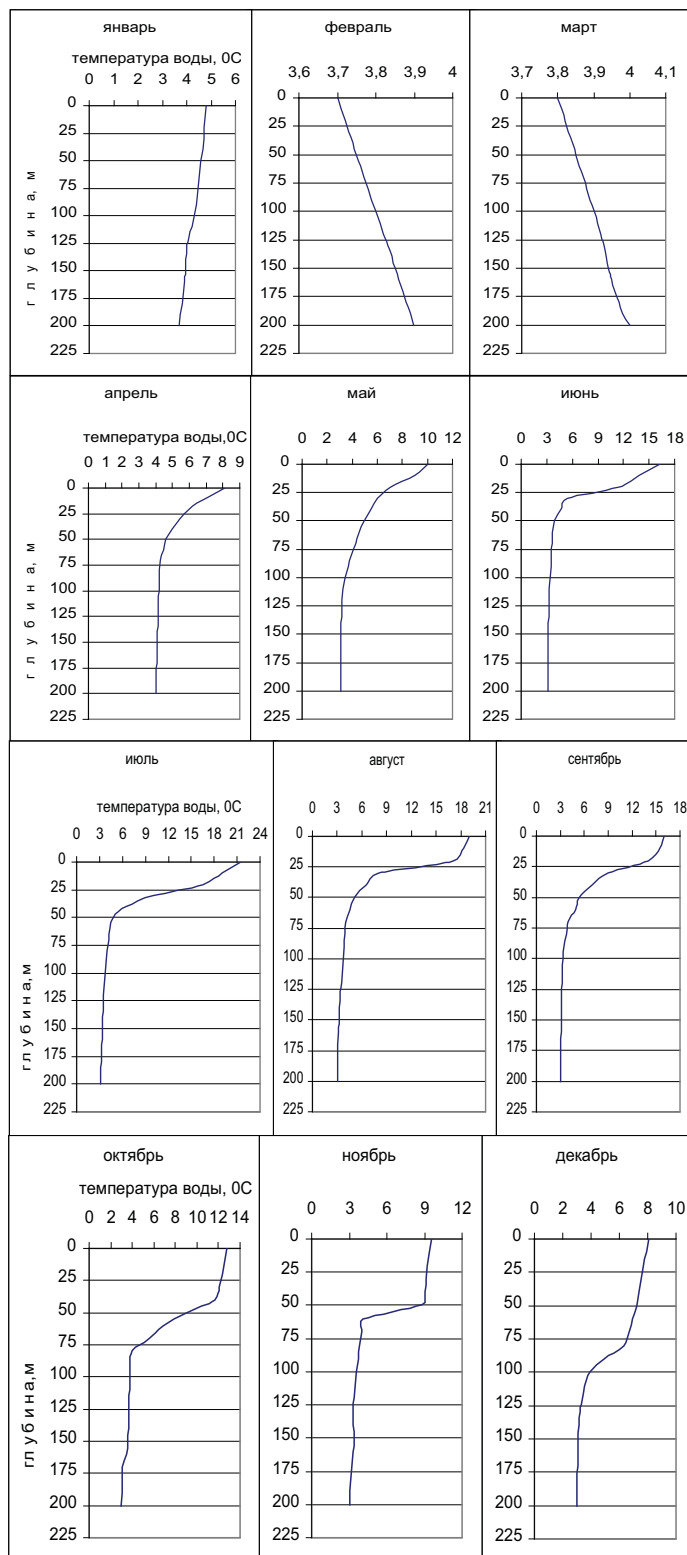


Рис. 1. Показание температуры по глубине 1973 года по месяцам.

Таблица 1

Вертикальное распределение растворенного в воде кислорода (мг/л) в рН на глубоководной станции (655 м) в оз. Иссык-Куль по разрезу Чолпон-Ата – Тон 1973 г. (данные Биологической станции НАН Кыргызской Республики)

Глубина, м	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0	6,64 -	6,56* 8,79	6,69 8,84	6,66 8,71	6,46 8,81	5,77 8,82	5,12 7,77	6,21 8,79	6,02 8,68	- -	6,45 8,74	6,63 8,71
5	6,59 -	6,57 8,79	6,69 8,82	6,62 8,71	6,74 8,81	6,81 8,80	5,16 7,78	6,42 8,76	6,10 8,68	6,06 8,76	6,58 6,77	6,49 8,75
15	6,59 -	6,54 8,78	6,65 8,89	6,79 8,72	6,75 8,89	6,58 8,84	6,53 7,77	7,15 8,81	6,51 8,68	6,15 8,78	- 8,77	6,54 8,76
25	6,61 -	6,51 8,71	6,67 8,82	6,81 8,71	6,95 8,77	7,00 8,85	7,18 7,78	7,19 8,80	7,27 8,71	6,59 8,79	6,73 8,75	6,69 8,79
50	6,58 -	6,50 8,80	6,63 8,82	6,66 8,70	6,90 8,77	6,95 8,81	7,06 7,79	7,20 8,80	6,92 8,67	6,93 8,77	7,15 8,75	6,71 8,75
100	6,79 -	6,87 8,82	6,59 8,81	6,53 8,74	6,63 8,89	6,55 8,80	6,75 7,82	6,47 8,76	6,52 8,68	6,52 8,82	6,75 8,75	6,47 8,66
150	6,27 -	6,35 8,84	6,67 8,84	6,49 8,80	6,55 8,85	6,54 8,87	6,57 7,80	6,39 8,80	6,40 8,65	6,46 8,74	- 8,80	6,46 8,74
300	6,97 -	6,15 8,78	6,32 8,82	6,37 8,76	6,35 8,75	6,34 8,89	6,46 7,77	6,14 8,77	6,14 8,64	6,19 8,75	- 8,84	6,07 8,73
600	5,55 -	6,76 8,76	5,91 8,80	6,02 8,80	6,94 8,84	6,88 8,80	6,05 7,80	5,86 8,75	5,69 8,61	5,76 8,69	6,12 8,71	6,01 8,75

*В числителе содержание кислорода, в знаменателе – рН.

В мае происходит дальнейшее повышение температуры воды в верхних слоях. В этом месяце отмечается первый пик в развитии фитопланктона. Доминирующим видом является *Gloeocapsa minor*. Высокие концентрации водорослей сосредоточены в верхнем 50-метровом слое воды. При этом, как и в другие месяцы, на поверхности водорослей несколько меньше, чем на остальных горизонтах верхнего 50-метрового слоя. Максимум численности (3151 тыс. кл./л) и биомассы (235 мг/м³) регистрируется на глубине 25 м. Интересно отметить, что в местах максимального количества фитопланктона отмечается наиболее высокое содержание растворенного в воде кислорода (табл. 1). Значительные концентрации водорослей прослеживаются до глубины 300 м, где численность фитопланктона равна 146 тыс. кл./л. В придонных слоях водорослей по-прежнему мало.

В летние месяцы отмечается хорошо выраженный температурный скачок. Наибольшие величины численности и биомассы регистрируются не на поверхности, а значительно глубже, на глубине 25 и 50. Максимум растворенного в воде кислорода по-прежнему находятся в местах

наибольшей концентрации водорослей. В июне-июле значительные концентрации водорослей отмечаются до глубины 100–150 м.

В августе слой, насыщенный фитопланктоном, значительно сокращается. В нижележащей толще воды численность водорослей относительно невелика и не превышает 65 тыс. кл./л, в придонном слое – 16 тыс. кл./л.

В сентябре верхняя граница слоя несколько опускается (рис. 1). Фитопланктона по сравнению с предыдущими месяцами становится меньше, видимо, это связано с более интенсивным поеданием его зоопланктоном. Вертикальное распределение в верхних слоях не испытывает больших колебаний (466–630 тыс. кл./л).

На глубине 100 м происходит резкое уменьшение количества водорослей, и на горизонте 150 м численность их не превышает 24 тыс. кл./л. В придонных слоях наибольшее значение по-прежнему принадлежит *Lyngbya contorta*.

В октябре-ноябре происходит постоянное понижение температуры воды (рис. 1). Уровень развития фитопланктона в осенние месяцы не испытывает больших изменений. Повышается значение диатомовых водорослей, роль которых

Вертикальное распределение численности (тыс. кл./л) *Gloeocapsa minor* в пелагиали оз. Иссык-Куль в 1973 г.

Глубина, м	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0	3,4	5,9	10,0	1,0	0,3	-	-	-	-	-	-	-
5	6,4	13,4	10,3	0,7	0,5	-	-	-	-	-	-	-
15	5,2	8,4	9,3	0,6	0,4	6,1	-	-	-	-	-	-
25	6,7	8,0	2,8	1,0	1,2	0,3	-	-	0,2	-	-	-
50	4,5	3,3	7,1	0,8	2,6	2,3	0,4	-	0,2	-	5,3	10,6
100	8,3	7,2	3,2	8,7	4,3	7,4	0,1	3,3	2,3	2,8	9,0	15,1
150	13,2	12,5	9,5	6,2	23,5	12,5	0,1	5,4	10,3	57,6	41,5	25,3

в другие месяцы незначительна. Численность фитопланктона в верхнем 50-метровом слое в октябре-декабре изменяется от 488 до 1736 тыс. кл./л, биомасса – от 76 до 287 мг/м³. В отличие от летних месяцев слой, насыщенный большим количеством водорослей, небольшой и простирается в основном до глубины 50 м, с максимальными концентрациями на глубине 25 м. Глубже фитопланктона очень мало.

Весьма интересно вертикальное распределение *Lyngbya contorta* в Иссык-Куле. Эта водо-

росль постоянно, хотя и в небольших количествах, присутствует во всем столбе воды с января по июнь. Начиная с июня этот вид исчезает из верхних слоев, но постоянно регистрируется в слое 100 – 600 м. Материалы и методика исследования представлены в работе А.А. Кулумбаевой [8].

Новый прибор создан учеными из МГУ и был использован для исследования фитопланктона оз. Иссык-Куль в 1999 г. (рис. 2) [9].

Спецификация прибора:

Вес: флуорометр – 10 кг, бортовой блок правления + кабель – 10 кг

Размер: проба – 250×250×300 мм, бортовой блок правления – 300×300×100 мм.

Погружаемая глубина – 50 м (максимально до 200 м).

Диапазон измерения: хлорофилл “а” 0,02÷20 мг/л, температура – 2÷35°C, освещенность 0,01÷500 Вт/м². Управляется с помощью IBM-PC переносного компьютера (ноутбук). Эл. напряжение: 220/110 вольт от сети или 24/12 вольт от аккумулятора.

Принципы двойной вспышки флуорометра. Погружной PC- управляемый флуорометр хлорофилла PrimProd 1.08 разработан для быстрого и удобного измерения концентрации хлорофилла и фотосинтетической активности фитопланктона. При использовании способа двойной вспышки для измерения интенсивности постоянной и переменной флуоресценции хлорофилла можно рассчитать концентрацию фитопланктона и квантовую эффективность фотосинтеза фитопланктона.

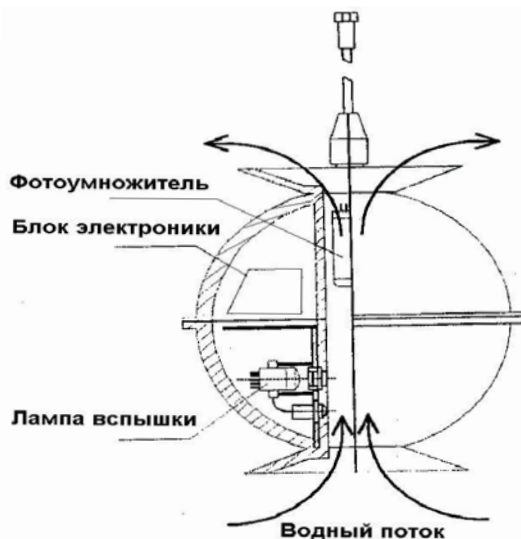


Рис. 2. Модификация PrimProd 1.08 – измерение концентрации хлорофилла и фотосинтетической активности и первичной продукции фитопланктона.

Значение концентрации хлорофилла и фотосинтетической активности одновременно отражается на дисплее компьютера в цифровой форме и в виде графика с временными значениями или погружаемая глубина (тип абсциссы определяется заранее пользователем). Подводная освещенность и температура также отражается на графике. Температура воды оз. Иссык-Куль измерялась на различных глубинах до 100 м наряду с другими показателями.

Водообмен в озере. Растворенные вещества могут переноситься от поверхности к глубокой воде вертикальной турбулентной диффузией и адвективными процессами. Вертикальная турбулентная диффузия всегда приводит к движению тепла в направлении от высоких к низким температурам и, следовательно, ведет к градуированному непрерывному нагреванию областей холодной глубинной воды. В оз. Иссык-Куль температуры обычно снижаются с увеличением глубины в течение всех сезонов, достигая минимальных значений в зоне самых больших глубин, что указывает на то, что адвективные процессы, переносящие холодную воду с поверхности на глубину, должны играть существенную роль в оз. Иссык-Куль.

Зимой на мелководных участках на западе и востоке озера при температуре максимальной плотности иссык-кульской воды 2,6°C формируется термический бар. Он представляет собой подвижную штору максимально плотной воды, проходящую от поверхности до дна озера, образующуюся за счет активного конвективного смешивания. С одной стороны термобара температура выше температуры максимальной плотности, а по другую – ниже. Такое распределение температур определяет наклон уровня поверхности к термобару. Благодаря этому в области термобара образуется зона конвергенции вод, и он хорошо прослеживается в тихую погоду по полосе спокойной воды и скоплению плавающего мусора.

На востоке озера в Тюпском заливе термобар появляется в середине – конце ноября [9]. В конце февраля – начале марта годовые теплозапасы озера характеризуются минимумом, а термический бар отсекает на западе и востоке озера максимальные площади прибрежных мелководий. В это время термический бар простирается по 20-метровой изобате вдоль северного побережья от бухты Чон-Аксу до траверза села Ойтал. Далее он поворачивает на юг, пересекая каньоны рек Тюп и Джергалан, а на западе озера отсекает мелководную часть залива Рыбачий с глубинами до 20–30 м.

В открытом озере температура воды всегда выше температуры максимальной плотности, а в прибрежных участках озера, отсекаемых термическим баром, наблюдаются температуры ниже 2,6°C и ледовые явления.

Летом горизонтальное распространение температуры на поперечном разрезе Чолпон-Ата – Кольцовка характеризуется наличием купола холодных вод. Такая термическая структура температуры объясняется эффектом спирали, управляемой циклоническим ветровым полем, что приводит к апвеллингу в центре озера [10, 11]. Апвеллинг может также объяснить, почему поверхностный слой высоких температур тоньше в центральной части озера, чем в мелководной прибрежной зоне. Кроме этого, градиенты горизонтальных температур возле поверхности могли быть усилены дифференциальным нагреванием.

Если в 1980-х годах температурные изменения внутри года происходили до глубины 100 м, то теперь они охватывают поверхностный слой до 300 м. Августовские температуры воды выше 5°C на станции 9 на глубине 200 м и повышенные величины солености у южного берега указывают на то, что летом у южного берега озера имеет место явление даунвеллинга с опусканием поверхностных теплых вод.

Известно [12], что при ветре, дующем вдоль берега, на мелководных участках направление ветра и течения практически совпадают, однако когда глубина больше глубины трения, происходит заметное отклонение поверхностного течения по часовой стрелке, причем, если течение отклоняется в сторону берега, возникает вертикальный ток, направленный вниз.

Применительно к оз. Иссык-Куль, где западный ветер улан дует вдоль южного берега, а восточный ветер санташ – вдоль северного течения, возбуждаемые ветром, отклоняются в сторону южного и северного берегов, у которых возникают вертикальные токи, направленные вниз.

Долговременное повышение февральских поверхностных температур в оз. Иссык-Куль также может быть обусловлено глобальным потеплением [13]. В любом случае, из-за того, что в оз. Иссык-Куль температура и плотностная стратификация тесно связаны, условия смешивания и относительная значимость адвективного и диффузионного смешивания в прошлом, возможно, были не такими, как сейчас.

Температура воды озера по глубине (табл. 3) [14] дает хорошую информацию о вертикальном водообмене Иссык-Куля. Уменьшение темпера-

Температура воды по глубинам

Глубина, м	Февраль 2003 г.	ΔT	Май 2003 г.	ΔT	Август 2003 г.	ΔT	Ноябрь 2003 г.	ΔT
0	5,39	6,12	11,51	7,41	18,92	-6,03	12,89	-7,83
10	5,09	4,42	9,51	8,63	18,14	-5,34	12,80	-7,86
20	5,08	2,78	7,86	6,54	14,40	-2,20	12,20	-7,28
30	5,07	1,97	7,04	2,56	9,60	1,60	11,20	-6,26
50	5,06	0,69	5,75	0,57	6,32	1,28	7,60	-2,62
100	5,08	-0,14	4,94	0,09	5,03	0,12	5,15	-0,24
200	4,84	-0,10	4,74	0,15	4,89	-0,03	4,86	-0,16
300	4,74	-0,13	4,61	0,00	4,61	-0,01	4,60	0,01
400	4,52	0,01	4,53	0,01	4,54	0,00	4,54	0,02
500	4,54	-0,08	4,46	0,05	4,51	-0,01	4,50	0,01
600	4,49	-0,06	4,43	-0,01	4,42	0,03	4,45	0,01
650	4,38	0,02	4,40	0,02	4,42	0,02	4,44	-0,02
Глубина, м	Февраль 2004 г.	ΔT	Май 2004 г.	ΔT	Август 2004 г.	ΔT	Ноябрь 2004 г.	ΔT
0	5,06	5,42	10,48	9,23	19,71	-8,54	11,17	-5,95
10	4,94	4,17	9,11	9,53	18,64	-7,47	11,17	-5,97
20	4,92	3,00	7,92	8,14	16,06	-4,95	11,11	-5,94
30	4,94	2,27	7,21	4,78	11,99	-1,00	10,99	-5,83
50	4,98	0,67	5,65	1,19	6,84	3,35	10,19	-5,08
100	4,91	0,05	4,96	0,19	5,15	0,40	5,55	-0,52
200	4,70	0,13	4,83	-0,04	4,79	0,03	4,82	-0,07
300	4,61	0,02	4,63	0,00	4,63	0,01	4,64	0,05
400	4,56	0,01	4,57	-0,04	4,53	0,03	4,56	0,06
500	4,51	-0,02	4,49	0,02	4,51	0,04	4,55	-0,01
600	4,46	0,00	4,46	0,00	4,46	0,04	4,50	-0,02
650	4,42	-0,02	4,40	-0,01	4,39	0,08	4,47	0,00

туры в слое 100–600 м в мае 2003 г. по сравнению с февралем 2003 г. свидетельствует о том, что после февральских измерений произошло значительное выхолаживание озера и конвективное перемешивание произошло до максимальных глубин. В феврале 2004 и 2005 гг. перемешивание водной массы озера происходило, соответственно, до 200 и 400 м. Интересен факт значительного увеличения температуры в слое 100–650 м в ноябре 2004 г. по сравнению с августом 2004 г. При этом отмечается самое значительное увеличение на глубине 650 м, которое постепенно уменьшается вверх до глубины 300 м. Механизм увеличения температуры в зоне максимальных глубин в ноябре, когда конвекцией был охвачен только верхний 30-метровый слой, остается не выясненным. В ноябре наблю-

дали увеличение температуры воды на глубинах 500, 600 и 650 м.

Современное потепление климата в Иссык-Кульской котловине происходит за счет потепления холодного периода – с ноября по март включительно. Особенно оно велико в феврале.

В связи с сокращением продолжительности и потеплением холодного периода при конвективном перемешивании тепло из верхних слоев озера поступает на большие глубины.

Самое большое изменение температуры воды в 2004 г. по сравнению с 1983 г. произошло в слое термического скачка – 20–50 м. В поверхностном слое 0 – 300 м увеличение температуры составило 0,49°C, а в слое 300–668 м – 0,54°C. В среднем температура воды в оз. Иссык-Куль увеличилась в 2004 г. по сравнению с 1983 г. на 0,51°C.

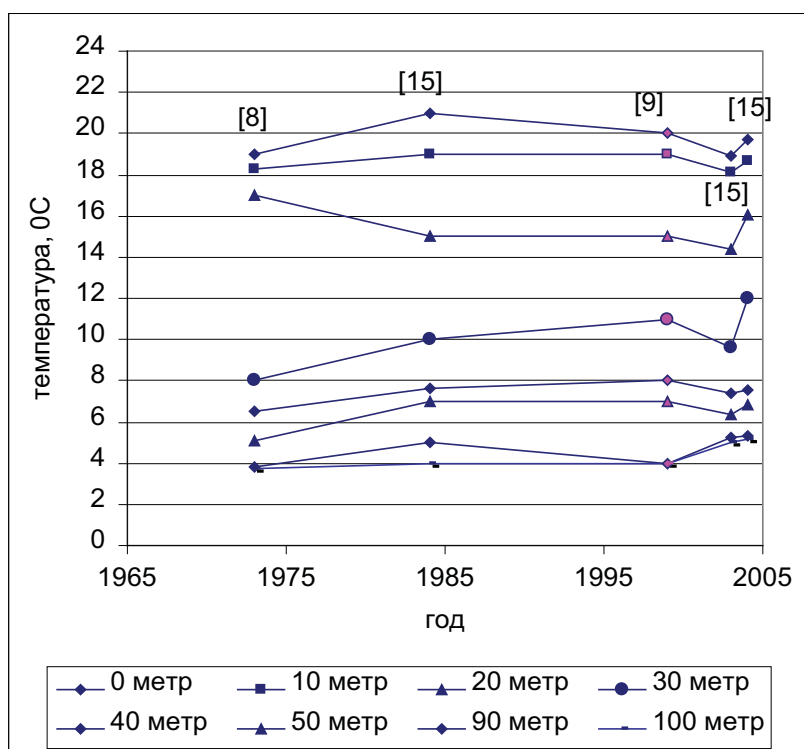


Рис. 3. Динамика изменения температуры по глубинам до 100 м в августе с 1973 по 2004 г.

На станции №5 поперечного разреза Чолпон-Ата – Кольцовка, расположенной вблизи циклонического вихря, температура воды на глубине 650 м составила в 2003 г. $4,39^{\circ}$, в 2004 г. $4,44^{\circ}$ (рис. 3).

По динамике изменения температуры по глубинам до 100 м в августе месяце с 1973 по 2004 г. видно, что температура со временем на глубине 40 м и ниже имеет тенденцию к ее повышению, но на глубинах 30 м и выше в среднем тенденция схожая.

Таким образом, для вертикального распределения фитопланктона в оз. Иссык-Куль характерно то, что большую часть года (март–июль) значительные концентрации водорослей отмечаются не только в верхнем продуцирующем слое, но и на большей глубине порядка 100–150 м.

Сезонная динамика хлорофилла а определяется в летний период в основном двумя факторами – температурой воды и количеством биогенных элементов, которое зависит от интенсивности вертикального перемешивания.

Отмечено, что максимум численности и биомассы водорослей обычно приурочен не к поверхности, а к глубинам 25 – 50 м. Следует здесь же отметить, что вся водная толща озера, вплоть до максимальных глубин (600 м) содержит фитопланктон, хотя и в очень небольших концентрациях. Водоросли глубинных слоев Иссык-Куля находятся в хорошей сохранности. Если рассматривать биомассу водорослей в верхнем 50-метровом слое, то ее величина в течение года меняется от 1,0 до $10,5 \text{ г/м}^3$, во всем столбе воды (0–600 м) биомасса фитопланктона намного больше и составляет $6\text{--}41 \text{ г/м}^2$.

Г.И. Поповская (1976) указывает, что в Байкале высокие концентрации фитопланктона, находящиеся за зоной фотосинтеза на больших глубинах в летне-осенние месяцы, служат пастбищем для питания зоопланктона. В полной мере это применимо и к такому глубоководному озеру, как Иссык-Куль.

Важнейшую роль в водообмене глубинных вод озера играет термический бар. Сформированная в нем водная масса с температурой,

близкой к температуре максимальной плотности (2,6°), поступает от прибрежной зоны к наиболее глубоким горизонтам в центре озера.

В результате климатических изменений температура водной массы озера за период с 1983 по 2004 г. повысилась на 0,51°С [15].

Уникальность результата в том, что используемый прибор позволяет одновременно измерить температуру воды и состояние фитопланктона.

Литература

1. Скабичевский А. П. О парении растительных планктонных организмов. – М.: ДАН СССР. – 1948а, 59, 4.
2. Сорокин Ю. И. О применении радиоуглерода для изучения первичной продукции водоемов // Тр. Всесоюз. гидробиол. о-ва. – 1956. – №VII.
3. Семина Г. И. Факторы, влияющие на вертикальное распределение фитопланктона в море // Тр. Всесоюз. гидробиол. о-ва, 1957. – № 8.
4. Киселев И. А. Планктон морей и континентальных водоемов. Вводные и общие вопросы планктонологии. – М.: Наука, 1969. – №1.
5. Киселев И. А. Данные о фитопланктоне оз. Иссык-Куль // Зап. Гос. гидрол. ин-та. – 1932. – №VII.
6. Кулумбаева А. А. К флоре водорослей пелагиали оз. Иссык-Куль // Проблемы географии Киргизии. Мат-лы к II съезду Киргиз, географ, о-ва. – Фрунзе: Илим, 1975а.
7. Орлова Т. Б. К термике озера Иссык-Куль // Мат-лы по геоморфол. и гидрол. Иссык-Кульской котловины. – Фрунзе: Илим, 1967.
8. Кулумбаева А.А., Фитопланктон озера Иссык-Куль. – Фрунзе: Илим, 1982.
9. Романовский В.В. Озеро Иссык-Куль как природный комплекс. – Фрунзе: Илим, 1990. – 168 с.
10. Romanovsky V.V., Shabunin G.D. Currents and vertical water exchange in Lake Issyk-Kul: Lake Issyk-Kul: Its Natural Environment. IV. Earth and Environmental Sciences. – 2002. – Vol. 13. – P. 77–87.
11. Романовский В.В., Шабунин Г.Д. Апвеллинг в озере Иссык-Куль // Динамика современных береговых процессов озера Иссык-Куль. – Фрунзе: Илим, 1981. – С. 160–169.
12. Хатчинсон Д. Лимнология. – М.: Прогресс, 1969. – 591 с.
13. Lake Issyk-Kul: Its Natural Environment. IV. Earth and Environmental Sciences. – 2002. – Vol. 13. – 302 с.
14. Шабунин А.Г. Гидродинамические процессы озера Иссык-Куль и их роль в формировании экологической обстановки в его бассейне: Дис. ... канд. техн. наук. – 2002. – С. 62–63.