

В.В. Заворуев^{1,2}, В.М. Домышева³, М.Н. Шимараев³, М.В. Сакирко³,
Д.А. Пестунов⁴, М.В. Панченко^{4,5}

Пространственное распределение флуоресцентных характеристик фитопланктона в период формирования весенней гомотермии в оз. Байкал

¹Институт вычислительного моделирования СО РАН,

²Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

³Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск

⁴Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

⁵Томский государственный университет

Поступила в редакцию 7.02.2008 г.

Обсуждаются результаты пространственного распределения (по вертикали и горизонтали) хлорофилла фитопланктона и его фотосинтетической активности, которые измерялись по флуоресцентным параметрам. Проведена оценка доли биомассы микроводорослей, находящихся в зоне фотосинтеза, от общей биомассы фотосинтетиков, распределенных во всем столбе воды. Оценка биомассы фитопланктона над термоклином показывает, что в разных частях Байкала эта доля составляет от 30 до 50% от общего количества. Следовательно, в процессе газообмена «вода–атмосфера» в период формирования весенней гомотермии может принимать участие менее половины фотосинтезирующих организмов, находящихся в воде оз. Байкал.

Введение

Основываясь на высокой степени чистоты и постоянстве химического состава воды оз. Байкал, можно полагать, что именно здесь имеется потенциальная возможность достаточно корректно выделить физические, химические и биологические составляющие в сложном процессе газообмена «вода–атмосфера». Исходя из этих соображений, нами с 2002 г. на Байкале была начата серия комплексных экспериментов по исследованию процессов газообмена углекислого газа в системе «водная поверхность–атмосфера» [1]. На основе многочисленных результатов [2–9] и данных, полученных нами в литорали озера [10, 11], выявлено, что в этом процессе основной сезонной и межгодовой переменной является биологическая составляющая.

Очевидно, что в изменении концентрации углекислого газа, кислорода и биогенных элементов в воде ключевую роль играет процесс фотосинтеза. В то же время классические методы учета биомассы планктонных водорослей и измерения интенсивности фотосинтеза весьма трудоемки, длительны по времени, что является серьезным препятствием для их применения в мониторинговом режиме. Отчасти их могут заменить соответствующие экспрессные методики флуоресцентного анализа [12].

Цель настоящей статьи заключалась в выявлении закономерностей пространственного распределения (по вертикали и горизонтали) хлорофилла

фитопланктона и его фотосинтетической активности, которые измеряли по флуоресцентным параметрам, применительно к проблеме газообмена; в оценке доли биомассы микроводорослей, находящихся в зоне фотосинтеза, от общей биомассы фотосинтетиков, распределенных во всем столбе воды в период формирования весенней гомотермии в оз. Байкал.

Расположение станций для отбора проб воды Байкала в период комплексной экспедиции ЛИН СО РАН на НИС «Г.Ю. Верещагин» 10–21 июня 2006 г. представлено на рис. 1.

Анализ результатов

Напомним, что пробы воды для анализа отбирались с горизонтов 0, 25, 50, 100, 200, 300 м и далее через каждые 100–200 м до дна глубоководными батометрами системы Нансена объемом 5 л. Далее в лабораторных условиях для каждого профиля определялись следующие характеристики медленной индукции флуоресценции хлорофилла фитопланктона [1, 12] (всего за период экспедиции 2006 г. получено 20 полных профилей, по которым определены флуоресцентные характеристики):

1) сигнал флуоресценции на стационарном уровне F_s ;

2) сигнал флуоресценции при добавлении в исследуемую пробу разобчителя электронно-транспортной цепи (в нашем случае диурона) возрастает

до максимального уровня F_d и с погрешностью порядка 30% связан с концентрацией хлорофилла и биомассой фитопланктона при однородном его составе.

Для оценки интенсивности протекания фотосинтеза использовали коэффициент фотосинтетической активности (КФА) фитопланктона, который рассчитывали по формуле [12]:

$$\text{КФА} = (F_d - F_s) / F_d.$$

На рис. 2 приведена пространственная картина распределения КФА в оз. Байкал, полученная в период проведения экспедиции.

Из представленных на рис. 2 данных видно, что по величине КФА можно выделить отличающиеся друг от друга зоны. Наиболее «мощная» зона с довольно высоким значением КФА приходится на центральную часть Байкала. Два других ядра со значениями КФА, равными 0,2, приходятся на северную часть озера. В южной части озера наблюдались значения КФА около 0,12. Из этих фактов и ранее накопленного материала [2–9] следует, что дальнейший анализ параметров флуоресценции и температуры разумно провести раздельно для южной, средней и северной зон Байкала.

Для начала проанализируем вертикальное распределение температуры в южной, средней и северной частях оз. Байкал (рис. 3).

Данные о вертикальном распределении температуры показывают, что в период работ во всех частях озера преобладала обратная температурная стратификация с хорошо выраженным мезотермическим максимумом на глубинах от 150 до 200–250 м. Температура поверхностного слоя менялась от 2,6–3,1 °С в южной и средней до 2,1–2,6 °С в северной частях озера. Слой температурного скачка залегал на глубинах от 40–130 до 90–170 м в южной, от 70–115 до 130–170 м в средней и от 50–70 до 90–150 м в северной частях озера. По условиям вертикального обмена период наблюдений соответствовал фазе активного развития весенней температурной конвекции в верхних слоях озера, сопровождающейся увеличением размеров верхнего перемешанного слоя по мере приближения температуры поверхности к ее значениям в области мезотермического максимума (3,5–3,6 °С). Из всех станций переход к полной гомотермии зафиксирован лишь в центре разреза Кадильный – Мишиха в южной части озера. Здесь до глубины 320 м температура была однородной при ее значениях около 3,5 °С. Значительно ослаблен был слой скачка и в зоне отепляющего влияния вод р. Верхней

Ангары на станциях в середине разреза Тья–Немнянка и в 7 км от Н.-Ангарска, где температура поверхности повысилась до 3,3–3,4 °С.

На рис. 4 приведены профили сигнала флуоресценции F_d для тех же зон, что и при анализе температуры.

Все вертикальные профили флуоресценции хлорофилла фитопланктона характеризуются тем, что имеют ярко выраженный максимум в верхнем стометровом слое (рис. 4).

Максимум F_d тесно связан с распределением температуры и располагается или в верхней части слоя скачка, или выше его верхней границы в слое с квазиоднородным распределением температуры (табл. 1).

В ряде профилей в глубинных слоях воды Южного Байкала довольно четко проявлялся и второй максимум интенсивности флуоресценции хлорофилла, вдвое меньший по величине по сравнению с основным (см. рис. 4, южная часть). На всех станциях пелагиали северной части Байкала в пределах глубинной зоны ниже 200 м также обнаруживались промежуточные максимумы. Их появление может быть связано с динамическими процессами, ведущими к глубокому опусканию вод из верхних слоев. Такие процессы связаны с развитием глубинной температурной конвекции в период весеннего прогрева озера в условиях пониженной вертикальной устойчивости водных масс. По наблюдениям в июне 1992–1993 гг. и в июле 1997 г. [13] они приводили к появлению глубинных максимумов концентрации гетеротрофных микроорганизмов, что указывает на относительно быстрое поступление органического вещества из фотической зоны. В июне 2006 г. признаки глубинной конвекции фиксировались по наличию интрузий холодных вод в придонном слое на станции у б. Песчаной в южной части, а также почти на всех глубоководных станциях северной части озера. Отметим, что в то же время в Среднем Байкале, где также имели место холодные придонные интрузии, глубинных максимумов F_d не обнаружено. Слабая тенденция возрастания флуоресценции хлорофилла отмечена здесь только на центральной станции разреза м. Ухан – м. Тонкий.

Распределение КФА на всех станциях южной и средней частей Байкала, кроме станции, расположенной на разрезе м. Кадильный – р. Мишиха, характеризуется основным максимумом в верхнем стометровом слое (рис. 5). Наблюдаемое исключение в распределении КФА совпадает с гомотермией воды в районе исследования.

Таблица 1

Характеристика	Глубина расположения максимума F_d и верхняя и нижняя границы слоя скачка температуры, м								
	Номер станции								
	Южного Байкала		Среднего Байкала			Северного Байкала			
	4	5	7	9	10	13	14	15	18
F_d	100	100	25	100	50	100	25	25	50
Слой скачка	Отсутствует	94–130	96–142	92–144	115–142	105–160	54–138	52–104	45–90

В северной части Байкала глубинные максимумы КФА по своей величине равны либо половине от значения КФА в верхнем стометровом слое, либо превышают его. Довольно часто отмечается совпадение положения максимумов флуоресценции и КФА фитопланктона (см. рис. 4, 5).

Оценка доли биомассы микроводорослей, находящихся в зоне фотосинтеза

Прежде чем проанализировать полученные данные по флуоресценции применительно к оценке биомассы, необходимо сделать следующие замечания.

Предварительный анализ профилей флуоресценции для всего диапазона глубин показал, что практически во всех реализациях величина сигнала F_d на глубинах свыше 200–300 м становится близка к сигналам от дистиллированной воды (для дистиллированной воды $F_d = F_s$). Поскольку это значение F_d рассматривается нами как фоновое для нашего прибора, то его величина вычитается из сигналов для каждой пробы при обработке результатов. Отсюда очевидно, что данные, полученные на глубинах свыше 200 м, отягощены весьма большими ошибками, которые при оценке концентрации хлорофилла в отдельных реализациях могут достигать 100%. Именно по этой причине все нижеприведенные величины должны рассматриваться как оценочные и вряд ли могут быть использованы в расчетах, требующих большой точности.

При оценке толщины слоя фотосинтеза нами использованы следующие данные. Известно, что при наступлении гомотермии прозрачность S байкальской воды по диску Секки достигает 40 м [14]. Следовательно, слой воды, в котором может осуществляться эффективно фотосинтез [15], составляет $2,5S = 100$ м.

В табл. 2 представлены средние величины и среднеквадратические отклонения интенсивности флуоресценции хлорофилла фитопланктона и КФА в верхнем стометровом (фотическом) слое.

Таблица 2

Средняя интенсивность флуоресценции хлорофилла и КФА в верхнем стометровом слое Байкала

Показатель	Юг	Центр	Север
Флуоресценция, отн. ед.	$0,34 \pm 0,11$	$0,84 \pm 0,24$	$0,27 \pm 0,11$
КФА	$0,14 \pm 0,06$	$0,25 \pm 0,04$	$0,14 \pm 0,08$

Если допустить, что интенсивность флуоресценции пропорциональна концентрации хлорофилла фитопланктона и его биомассе, то можно рассчитать процент биомассы микроводорослей, находящихся в зоне фотосинтеза, от общей биомассы фотосинтетиков, распределенных во всем столбе воды. В табл. 3 приведена доля фитопланктона, находящегося в фотическом слое, от общей его биомассы.

Существует мнение, что в байкальских водах солнечный свет может проникать на глубину до

500 м [16]. Понятно, что интенсивность солнечной радиации на больших глубинах очень низка, однако некоторые фототрофы способны к фотосинтезу и при такой освещенности. В период проведения измерений слой температурного скачка находился на глубинах не более 200 м. В районе термоклина наблюдался основной максимум биомассы (флуоресценции) фитопланктона. Отсюда мы оценили процентное содержание фитопланктона над термоклином в различных частях оз. Байкал (табл. 4).

Таблица 3

Доля (%) фитопланктона, находящегося в фотическом слое, от общей биомассы в столбе воды

Диапазон значений	Юг	Центр	Север
	15–25	20–35	15–30

Таблица 4

Доля (%) фитопланктона, находящегося над термоклином, от общей биомассы в столбе воды

Диапазон значений	Юг	Центр	Север
	30–42	38–52	30–47

Полученные нами данные показывают, что в период формирования весенней гомотермии более половины всего фитопланктона находится вне фотического слоя. Эти результаты хорошо согласуются с выводами работы [15], в которой непосредственно анализировалось вертикальное распределение водной биоты.

Отсюда следует, что поскольку остальная биомасса фитопланктона сосредоточена преимущественно под термоклином, то эта часть фототрофов не может непосредственно влиять на поглощение двуокиси углерода в системе «атмосфера–вода».

Заключение

Отметим одну наиболее интересную особенность распределения коэффициента фотосинтетической активности биоты КФА по акватории озера. В Южном Байкале (середина гидрологической весны), а также в Северном (практически сразу же после схода ледового покрова) активность биоты в целом характеризуется невысокими значениями КФА. В то же время начало гидрологической весны на Среднем Байкале сопровождается интенсивным действием водных фотосинтетиков.

Такая же закономерность наблюдается в распределении биомассы фитопланктона, определенной по величине F_d , в верхнем стометровом слое воды. Наибольшее значение F_d зарегистрировано в центральной части Байкала, где, как сказано выше, в этот период времени было начало гидрологической весны.

Оценка биомассы фитопланктона над термоклином показывает, что в разных частях Байкала эта доля составляет от 30 до 50% от всей его биомассы. Следовательно, в этот гидрологический сезон на Байкале более половины фототрофов сосредоточено

в афотической зоне, где фотосинтез маловероятен. И отсюда можно заключить, что в процессе газообмена системы «вода–атмосфера» в период формирования весенней гомотермии может принимать участие менее половины фотосинтезирующих организмов, находящихся в воде оз. Байкал.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Отделения наук о Земле РАН № 13, экспедиционного гранта СО РАН и гранта РФФИ № 08-05-00258-а.

1. Панченко М.В., Домышева В.М., Пестунов Д.А., Сакирко М.В., Заворуев В.В., Новицкий А.Л. Экспериментальные исследования процессов газообмена CO₂ в системе «атмосфера–водная поверхность» оз. Байкал (постановка эксперимента) // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20. № 5. С. 448–452.
2. Верещин Г.Ю. Суточный ход некоторых гидрологических элементов на Байкале и его лимнологическое значение // Тр. Байкальской лимнологической станции. 1932. Т. 2. С. 107–201.
3. Яснитский В.Н., Бланков Б., Гортиков В.М. Отчет о работах Байкальской биологической станции при Иркутск. биолого-географ. институте за 1926–1927 гг. // Изв. БГИ при Ирк. гос. ун-те. 1930. Т. 3. Вып. 3. Гортиков В.М. Гидрохимические исследования лета 1927 г. в районе Байкальской биологической станции в Больших Котах // Изв. БГИ при ИГУ. 1927. Т. 4. Вып. 3–4. С. 235–253.
4. Бочкарев П.Ф., Власов Н.А., Козьяр М.П. Наблюдения над суточным ходом некоторых гидрохимических факторов в воде оз. Байкал // Тр. ИГУ. Сер. хим. 1947. Т. 3. Вып. 1. 27 с.
5. Вотинцев К.К. Гидрохимия озера Байкал. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 310 с.
6. Мизандронцев И.Б., Горбунова Л.А., Домышева В.М., Мизандронцева К.Н., Шимараев М.Н. Газообмен Байкала с атмосферой в период весеннего прогрева // Геогр. и природ. ресурсы. 1996. № 2. С. 74–84.
7. Мизандронцев И.Б., Горбунова Л.А., Домышева В.М., Мизандронцева К.Н., Томберг И., Шимараев М.Н.

- Газообмен Байкала с атмосферой в осенний период // Геогр. и природ. ресурсы. 1998. № 1. С. 61–70.
8. Мизандронцев И.Б., Домышева В.М., Шимараев М.Н., Голобокова Л.П., Коровякова И.В., Мизандронцева К.Н., Жданов А.А., Гнатовский Р.Ю., Цехановский В.В., Чубаров М.П. Особенности газообмена Байкала с атмосферой при переходе от весеннего прогрева к летнему // Геогр. и природ. ресурсы. 2000. № 3. С. 55–62.
 9. Мизандронцев И.Б., Домышева В.М., Мизандронцева К.Н., Томас К. О суточной динамике концентраций свободной углекислоты и кислорода в воде Байкала // Геогр. и природ. ресурсы. 2002. № 1. С. 73–78.
 10. Домышева В.М., Пестунов Д.А., Панченко М.В., Хохрова О.М., Мизандронцев И.Б., Шмаргунов В.П., Ходжер Т.В., Белан Б.Д. О связи ритмов изменения содержания углекислого газа в придном слое воздуха и химического состава воды оз. Байкал // Докл. РАН. 2004. № 399. № 6. С. 825–828.
 11. Домышева В.М., Панченко М.В., Пестунов Д.А., Сакирко М.В. Атмосферные осадки и потоки CO₂ с водной поверхности Байкала // Докл. РАН. 2007. Т. 414. № 5. С. 1–4.
 12. Заворуев В.В., Панченко М.В., Домышева В.М., Сакирко М.В., Белых О.И., Поповская Г.И. Суточный ход газообмена CO₂ и интенсивности фотосинтеза в поверхностной воде оз. Байкал // Докл. РАН. 2007. Т. 413. № 3. С. 1–5.
 13. Парфенова В.В., Шимараев М.Н., Косторнова Т.Я., Домышева В.М., Левин Л.А., Дрюккер В.В., Жданов А.А., Гнатовский Р.Ю., Цехановский В.В., Логачева Н.Ф. О вертикальном распределении микроорганизмов в озере Байкал в период весеннего обновления глубинных вод // Микробиология. 2000. Т. 69. № 3. С. 433–440.
 14. Шерстянкин П.П. Оптические структуры и фронты океанического типа на Байкале: Автореф. дис. ... д.ф.-м. наук. 1993. 45 с.
 15. Баринев С.А. Первичная продукция водоемов как функция концентрации фитопланктона и прозрачности воды // Водные ресурсы. 1980. № 2. С. 137–158.
 16. Галазий Г.И. Байкал в вопросах и ответах. М.: Мысль, 1988. 285 с.

V.V. Zavoruev, V.M. Domysheva, M.N. Shimaraev, M.V. Sakirko, D.A. Pestunov, M.V. Panchenko.
Spatial distribution of phytoplankton fluorescent characteristics during the period of formation of spring homothermia in Lake Baikal.

Measurement results on spatial distribution (vertical and horizontal) of phytoplankton chlorophyll and its photosynthetic activity are discussed. The fluorescence parameters were used in the measurements. A share of micro-biomass algae in the photosynthesis zone in the general biomass of photosynthetics, distributed throughout the water column, was estimated. The phytoplankton estimate above thermocline shows the algae share to be between 30 and 50% of the whole amount. Consequently, in the gas exchange process «water–atmosphere» during formation of the spring homothermia the phytoplankton receives less than a half of photosynthesizing organisms from Lake Baikal.

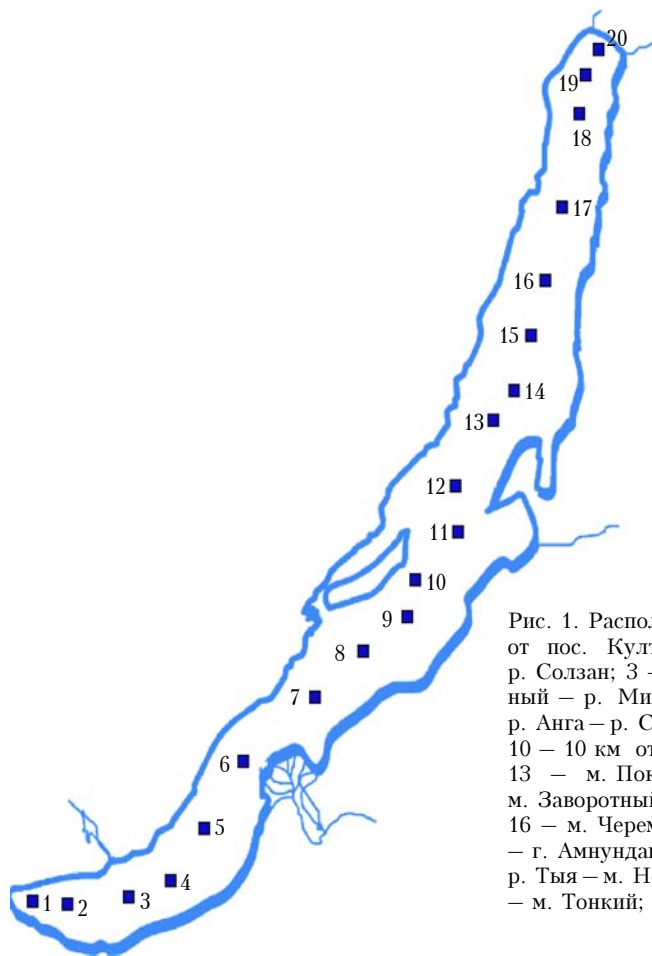


Рис. 1. Расположение станций отбора проб воды: 1 – 15 км от пос. Култук; *центры разрезов*: 2 – пос. Маригуй – р. Солзан; 3 – пос. Листвянка – пос. Танхой; 4 – м. Кадильный – р. Мишиха; 6 – м. Красный Яр – пр. Харауз; 7 – р. Анга – р. Сухая; 8 – Ольхонские ворота – пос. Болдаково; 10 – 10 км от м. Ижимей; 11 – м. Хобой – м. Крестовый; 13 – м. Покойники – Большой Ушканий остров; 14 – м. Заворотный – р. Сосновка; 15 – м. Елохин – пос. Давша; 16 – м. Черемшанный – р. Кабанья; 17 – м. Котельниковский – г. Амнундакан; 18 – пос. Байкальское – м. Турали; 19 – р. Тья – м. Немнянко; 5 – 10 км от б. Песчаной; 9 – м. Ухан – м. Тонкий; 12 – на Академическом хребте; 20 – 7 км от г. Нижнеангарска

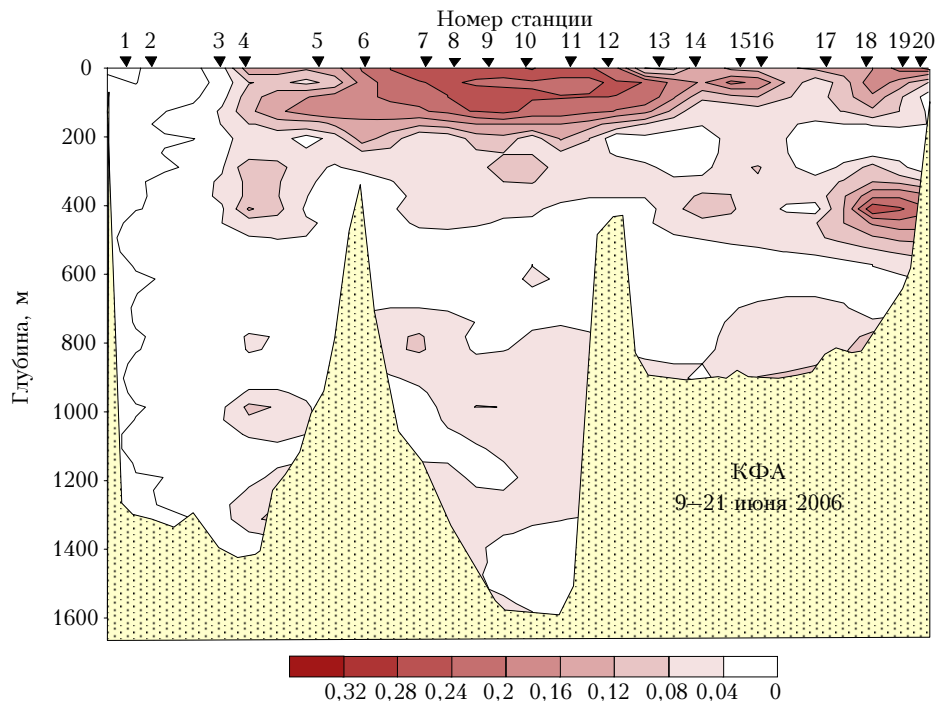
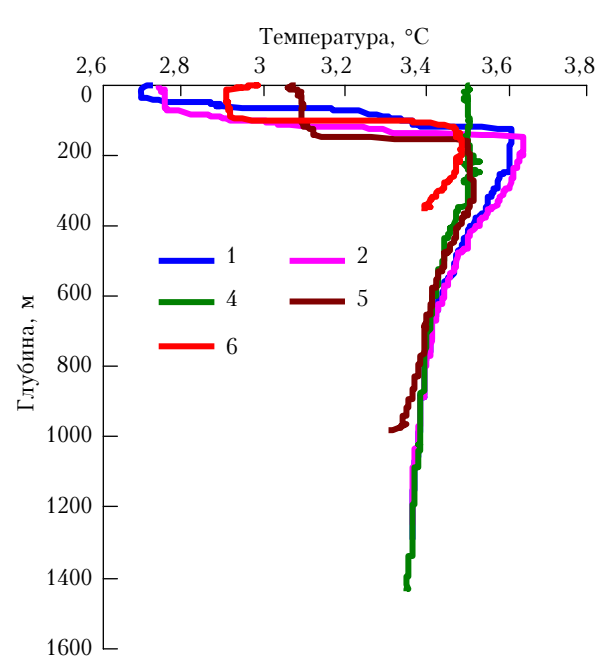
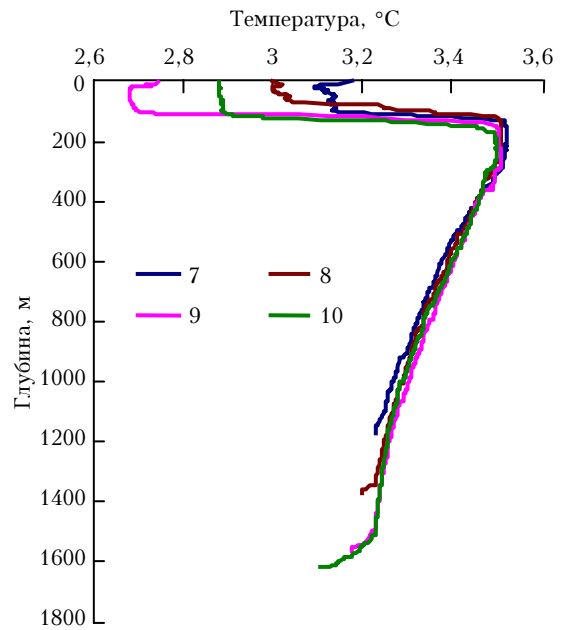


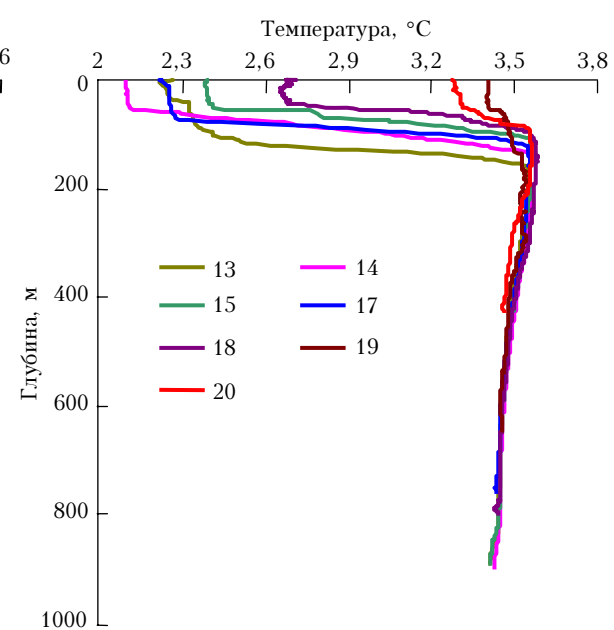
Рис. 2. Пространственное распределение КФА в июне 2006 г. (измерения флуоресцентных характеристик были начаты с 4-й станции)



Южная часть



Средняя часть



Северная часть

Рис. 3. Вертикальное распределение температуры в июне 2006 г. для разных зон оз. Байкал

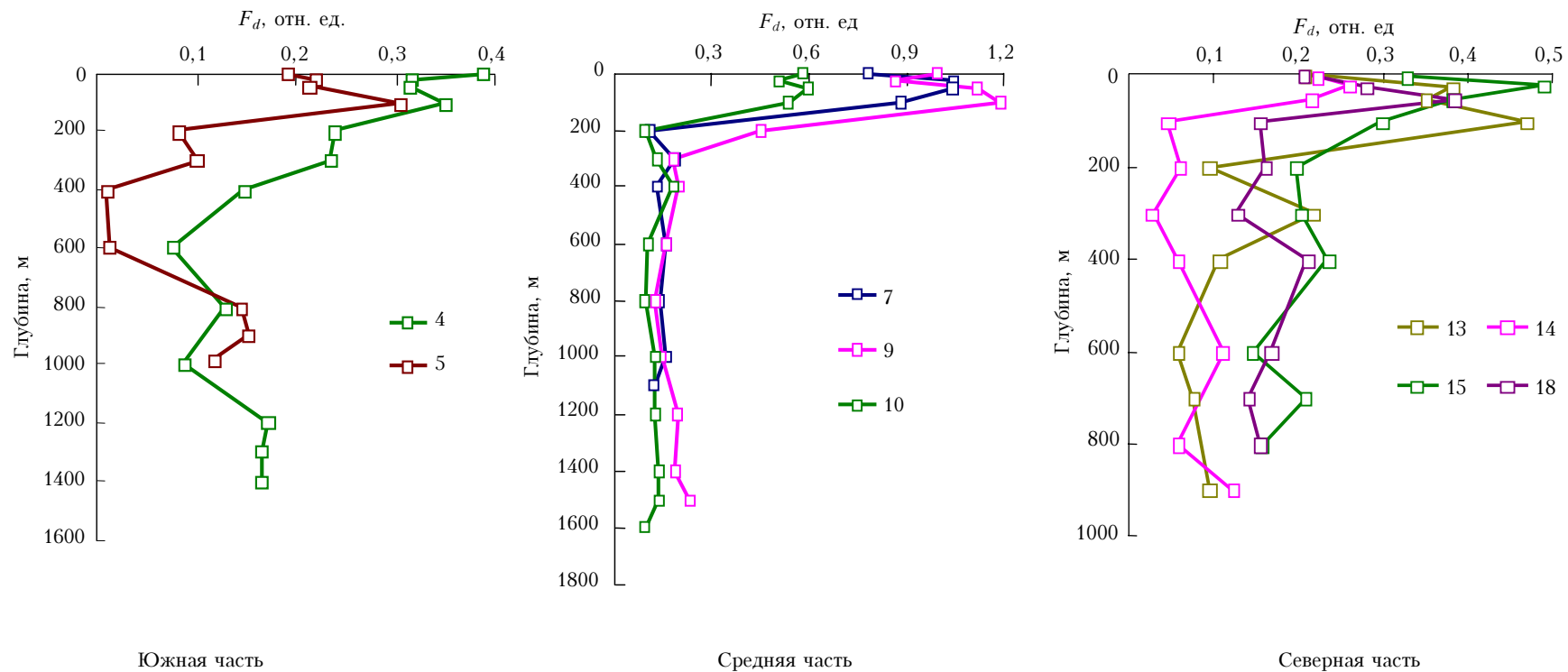


Рис. 4. Вертикальное распределение флуоресценции в июне 2006 г. для разных зон оз. Байкал

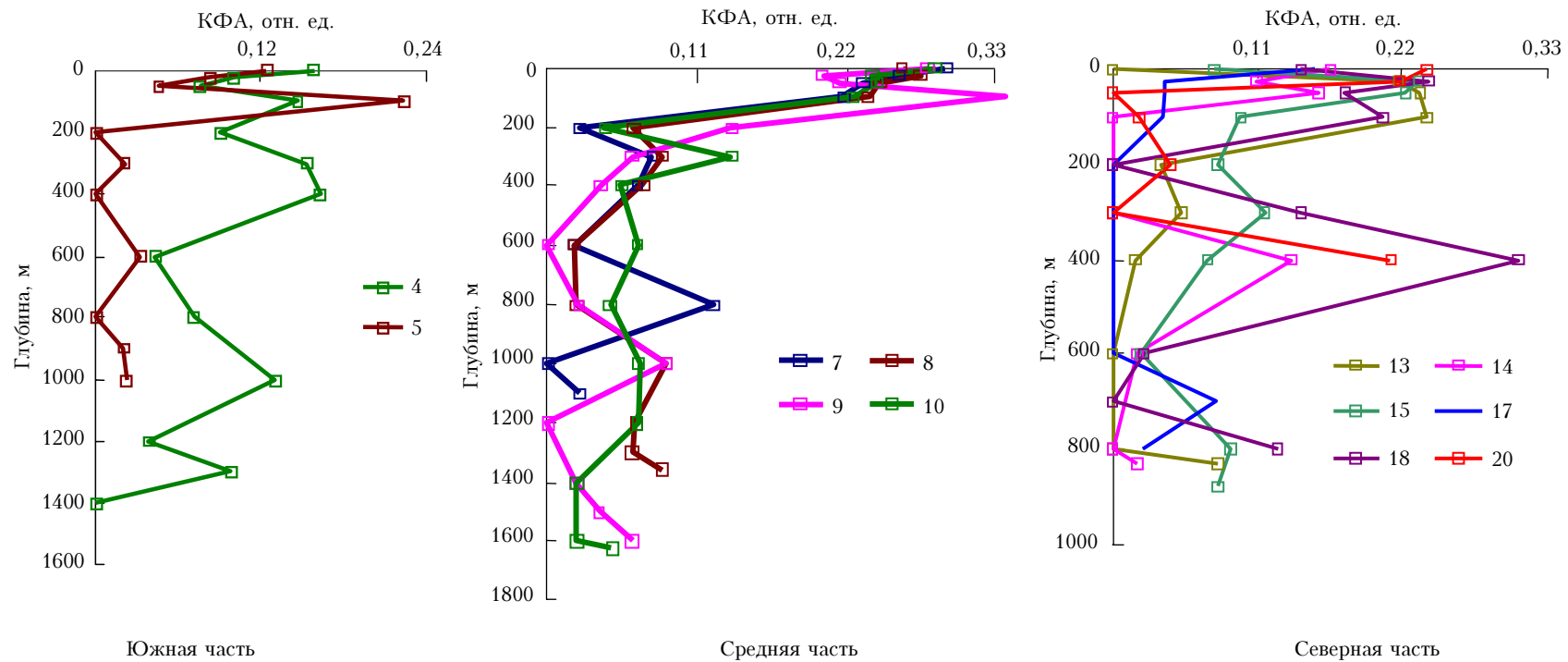


Рис. 5. Вертикальное распределение КФА в июне 2006 г. для разных зон оз. Байкала