

ВЕРТИКАЛЬНАЯ СТРАТИФИКАЦИЯ ВОДНЫХ МАСС В МАЛЫХ ОЗЕРАХ ЛЕСОСТЕПНОГО ПОВОЛЖЬЯ

© 2007 М.Ю. Горбунов

Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти

На основе данных о физико-химических условиях в ряде малых озер Самарской области и Республики Татарстан анализируются особенности формирования вертикальных градиентов физико-химических факторов в малых эвтрофных озерах лесостепного Поволжья. Показано, что в малых эвтрофных озерах этого региона, площадью менее 0,1 км² стабильная летняя стратификация формируется уже при максимальной глубине - более 2,0-2,5 м. Характерной особенностью обсуждаемых озер является высокий относительный объем металимниона. Предложена оценка стабильности, основанная на определении пороговой (критической) скорости ветра, необходимой для ее разрушения. Обсуждаются вопросы, связанные с формированием «вторичных» градиентов химических условий в стратифицированных малых эвтрофных озерах.

Введение

Внутренняя динамика водных масс озер оказывает влияние на разнообразные биологические, химические и физические процессы в водоемах [5, 16, 21, 22, 26]. В условиях гомотермии активные турбулентные течения могут охватывать весь объем озера. В большинстве случаев, однако, теплообмен с окружающей средой и поглощение солнечной радиации приводит к возникновению вертикальной неоднородности температуры в водоеме, т.е. к его термической стратификации [16, 18, 21, 26]. Вертикальный градиент плотности воды, связанный с ее различной температурой на разных глубинах, является барьером для вертикального перемешивания водоема.

Формирование стратификации приводит к изменению характера процессов массообмена водоема с атмосферой и донными осадками. В водоеме образуется ряд вторичных химических градиентов, связанных с градиентом плотности [16, 23, 26]. Это увеличивает число доступных для живых организмов экологических ниш, позволяя разным организмам развиваться в наиболее благоприятных для них условиях. Тем самым, стратификация оказывает влияние на процессы первичной продукции, деструкции и рециклинга биогенных элементов, а также видовой

состав и биоразнообразие гидробионтов [2, 4, 5, 14, 19-23].

В большинстве озер температурная стратификация водного слоя является главной или даже единственной причиной формирования градиента плотности воды. Однако существуют озера, в которых плотностное расслоение водного столба связано с различным химическим составом поверхностного и придонного слоя воды. В тех случаях, когда это расслоение достаточно для предотвращения полного перемешивания озер в период гомотермии, их называют меромиктическими или частично перемешиваемыми [15, 16, 23, 25].

Принято считать, что озера со средней глубиной менее 3 м, как правило, являются полимиктическими, т.е. не подверженными устойчивой летней стратификации, и только в условиях маловетреной погоды, иногда только на протяжении одного дня, в них может формироваться поверхностный (вторичный, временный или дневной) термоклин [27]. Однако особенности термической стратификации водоемов варьируют в зависимости от особенностей их ложа и прилегающей территории, характера и величины водообмена, а также климатических факторов. Известны многие мелкие озера, которые, благодаря особенностям их лож и котловин, все же длительно и стабильно стратифицирова-

ны в летний период [20, 21].

В данной работе на примере значительного числа озер анализируются особенности режима перемешивания водных масс в малых озерах лесостепной зоны Поволжья. Полученные данные показывают, что димиктический режим перемешивания с продолжительной летней стратификацией достаточно типичен для малых озер нашего региона. Наряду с полимиктическими и димиктическими озерами, обнаружены водоемы с неполным (меромиктическим) или нерегулярным перемешиванием. Обсуждаются также некоторые особенности гидрохимии озер, связанные с режимом их перемешивания, важные для функционирования их экосистем.

Объекты и методы исследования

В работе использованы результаты, полученные в ходе комплексных исследований озер Самарской Луки (1999, 2001-2003 гг.) [1, 8, 9, 11], г. Самара [3] и северо-восточной части Самарской области (2004-2005 гг.), Республики Татарстан (2005 г.), а также опубликованные данные по озерам Жигулевского заповедника [7]. Общая характеристика части озер представлена в ряде работ, опубликованных ранее [1, 3, 7-9, 11]. Поскольку в озерах глубиной менее 1 м, как правило, проводилось только определение температуры поверхностного и придонного слоев, в данной работе обсуждаются в основном более глубокие озера. Некоторые характеристики озер, которые наиболее важны для данного исследования, приведены в табл. 1. В 1999 г. вертикальная съемка физико-химических показателей (температуры, pH, Eh и концентрации растворенного кислорода) была проведена только дважды за сезон и только в озерах Б. Шелехметское и Подгорское. В последующие годы во всех озерах глубже 1,5 м проводилось подробное исследование вертикального распределения физико-химических характеристик в столбе воды. В программу работ не входили детальные исследования физической лимнологии озер. Поэтому температура воды измерялась погружным «родниковым» ртутным термометром с точностью 0,1-0,25 °С. Данные по химическому составу

воды получены с использованием общепринятых гидрохимических методов [6] и их полумикромодификаций с дискретностью по вертикали 1 м, а в озерах глубиной менее 1,5 м - только в поверхностном и придонном слое.

Устойчивость водного слоя к перемешиванию характеризовали величиной квадрата частоты плавучести (N^2) [18]:

$$N^2 = \frac{g}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z},$$

где g – ускорение силы тяжести, ρ – плотность воды, z – глубина слоя воды (отсчитываемая от поверхности воды).

При расчете устойчивости использовали табличные данные о зависимости плотности чистой воды от температуры [16], а также данные по минерализации воды Z , считая, что при постоянной температуре $(\rho_m - \rho_0)/M = 0,85$, где ρ_0 и ρ_m – плотности чистой воды и воды с минерализацией M (все величины в кг/м³). Общую стабильность рассчитывали как

$$W = \frac{g}{A_o} \left(\int_0^{z_m} z \rho_z A_z dz - z_v V \rho_{av} \right),$$

$$\text{где } \rho_{av} = \frac{1}{A_o} \int_0^{z_m} \rho_z A_z dz; \quad z_v = \frac{1}{A_o} \int_0^{z_m} z A_z dz$$

Здесь ρ_{av} – средняя плотность воды, z_v – глубина центра масс озера при постоянной плотности, z_m – максимальная глубина, ρ_z – плотность воды на глубине z , A_z – площадь озера под изобатой z м, V – общий объем озера [17].

Результаты

Температурные профили исследованных озер в летний период (рис. 1 и 2) подтверждают наличие в ряде из них выраженной летней стратификации. Как видно из рисунков, только в оз. Б. Шелехметское в июле 1999 г. вертикальный градиент температуры во всем столбе воды был менее 1°С/м, – порога, который обычно считается признаком зоны термоклина. В остальных озерах высокие градиенты температуры охватывали значительную часть всего столба воды. В ряде озер (например, оз. Б. Шелехметское в июле 2002 г., –

рис. 1Д, оз. № 5 в бассейне р. Ик, рис. 2А, и в оз. Бездонное летом 2001 г. и в июле 2002 г. - не показано) наблюдался сильно выражен-

ный поверхностный градиент температуры (вторичный поверхностный термоклин).

Таблица 1. Основные характеристики некоторых озер лесостепного Поволжья в летний период

Водоем		Площадь, га	Глубина, м (макс./ср.)	Минерализация, мг/л		Т _{макс}	ΔТ _{макс} (пов.-дно)
				пов.	у дна		
Озера поймы и надпойменной террасы Самарской Луки							
Б. Шелехметское		28,0	3,5	342-315	370-650	30,0	15,0
Клюквенное		3,0	1,2-1,5	105-109	105-114	28,0	5,7
Опкан		~6	0,6	148	-	26	-
Лизинка		~2	0,6	142	-	21,5	-
Озера и пруды Жигулевской возвышенности							
Подгорское (пруд)		0,28	2,5	390	455	22,5	5,5
Золотенка		0,08	4-5,8	51	49	21,3	7,0
Серебрянка		0,11	0,9	44	-	23,1	1,9
Харовое		0,04	1,85	268	275	24,8	6,8
Бездонное		0,14	5,5	110	150	27,5	15,5
М. Карстовое		0,02	3	101	125	26,3	13,8
"Родниковое"		~0,2	2,5	201	258	21,8	5,3
Н. Сосново-Солонецкий пруд		~1,5	4	242	243	24,2	8,0
Искусственные водоемы на территории Жигулевского заповедника [7]							
"Тудрон- ные"	№ 1	0,14	4,2	44	82	23,6	12,2
	№ 2	0,11	3,7	216	417	22	12,2
	№ 3	0,054	0,9	124	130	22	4,6
	№ 4	0,05	0,7	129	150	20,4	4,6
"Стрель- ные"	№ 5	<0,2	3,8	298	490	20,6-22,6	11
	№ 6		1,5	196	207		7,4
	№ 7		2	213	229		7,4
	№ 8		3,7	209	406		11
Прочие озера и пруды Самарской области							
Нижний пруд БС СамГУ		0,55	5,5	808	1342	25	12,5
Голубое-3		0,27	4,7	1170	1260	21,5	4,0
у с. Успенка		0,38	1,5	180	180	22,5	1,5
Карстовые озера у с. Новый Каразерик (бассейн р. Ик, Татарстан)							
№ 1		0,02		216	-		
"Мохо- вое"	Басс. 1	1,57	3	128	150	21	1,5
	Басс. 2	0,05	3,5	138	266	21	7
	Басс. 3	0,20	4	136	263	19,5	5,5
№ 3		0,24	8	141	274	21,3	10,3
Пойменные и междюнные озера бассейна р. Ик (Татарстан)							
№ 4		0,06	1,5	435	442	19,5	3,0
№ 5		1,65	5	814	882	21	4,7
"Круглое"		0,3	1,2	208	-	22	0,3
Лебяжье		-	3	256	258	20,5	2,4
"Зерекликуль"		-	4,5	1030	1590	21,2	16,6
Кзылтан		4,7	1,5	108	-	20,2	0,2

Устойчивость водного слоя к перемешиванию определяется не градиентом температуры как таковым, а градиентом плотности воды, зависимость которой от температуры нелинейна [16]. Поэтому ее принято характеризовать показателями, пропорциональными градиенту плотности, в частности, квад-

ратом частоты плавучести (частоты Брента-Вясалая, N^2). Чем выше этот показатель, тем большая внешняя работа требуется для перемешивания водного слоя; отрицательные значения N^2 (мнимые N) указывают на его неустойчивость и самопроизвольное перемешивание.

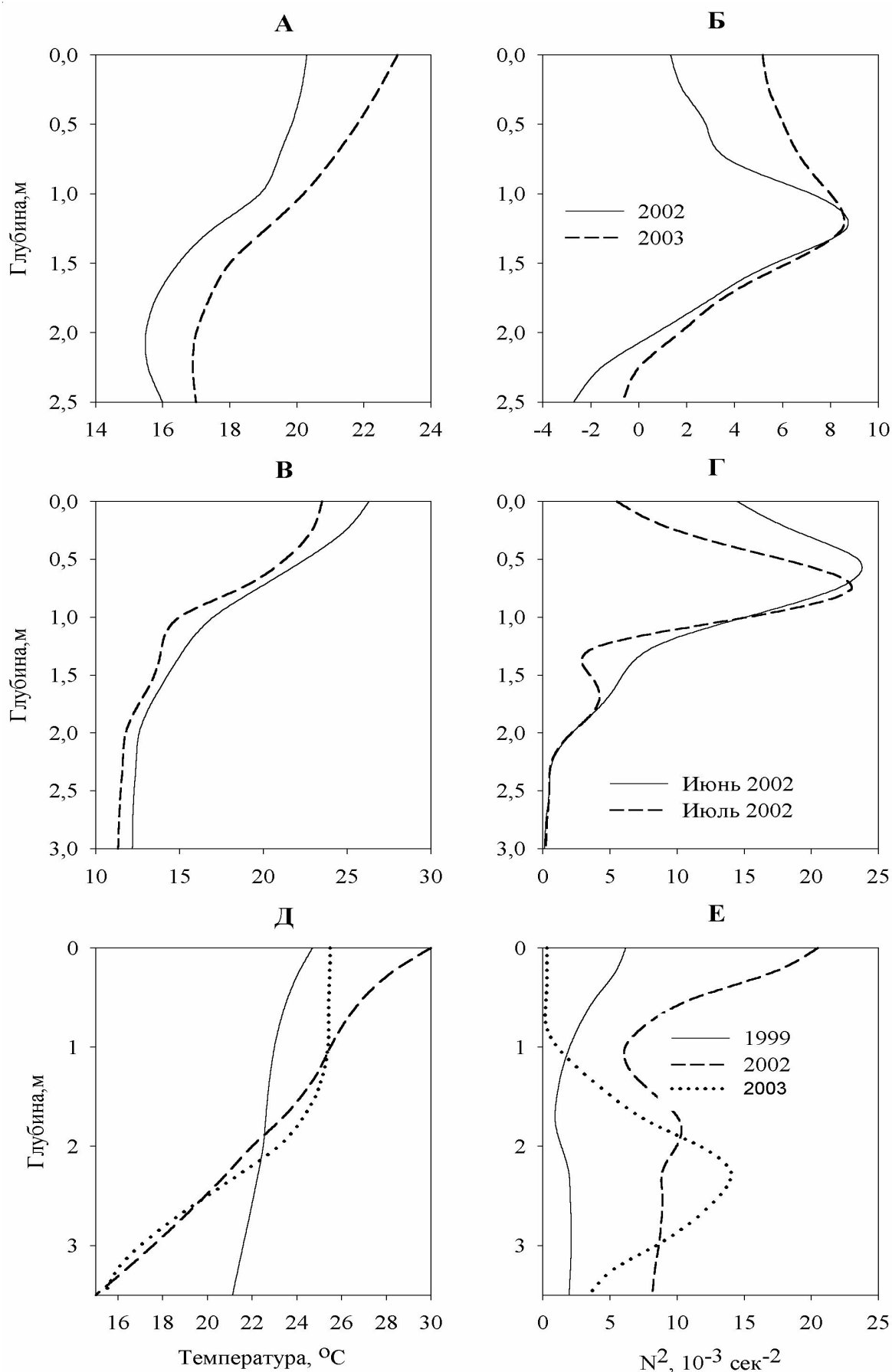


Рис. 1. Вертикальные профили температуры (А, В, Д) и соответствующие им профили термической стабильности N^2 (Б, Г, Е) в озерах Самарской Луки: Подгорское (А, Б), М. Карстовое (В, Г) и Б. Шелехметское (Д, Е) в июле

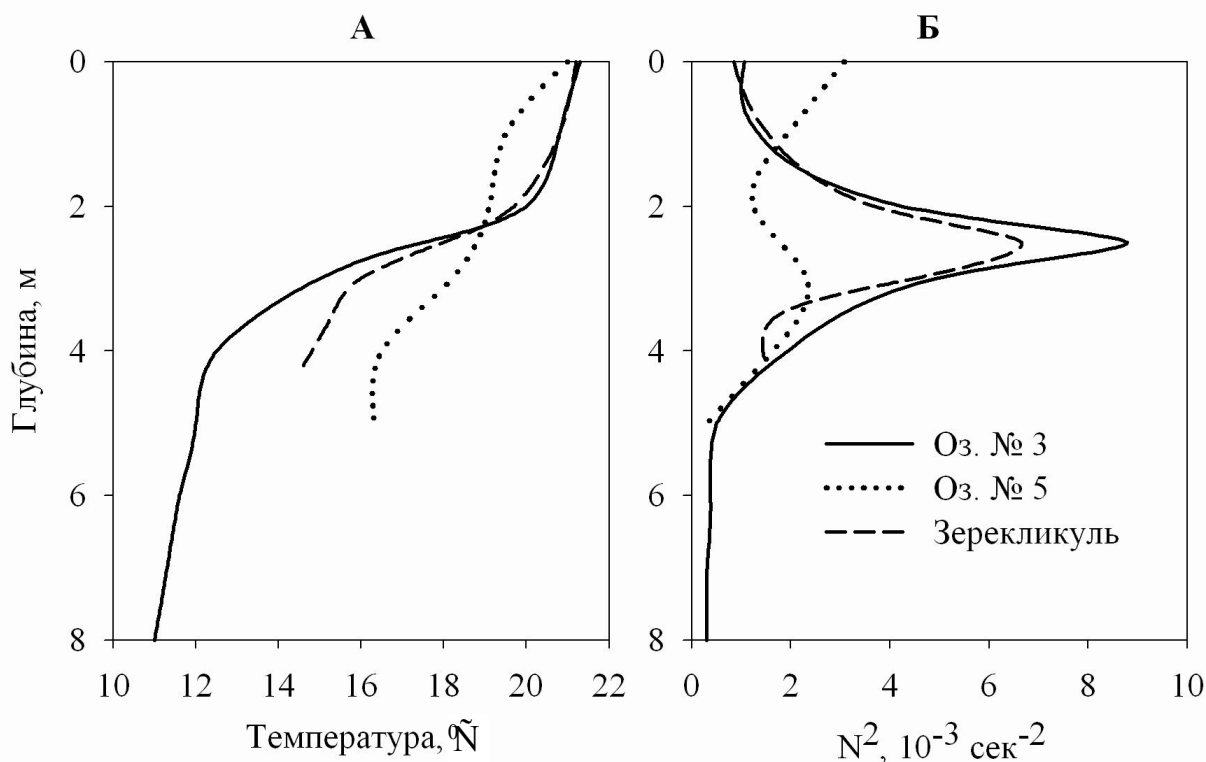


Рис. 2. Вертикальные профили температуры (А) и соответствующие им профили термической стабильности N^2 (Б) в некоторых озерах бассейна р. Ик в июле 2005 г.

Анализ графиков вертикальных профилей стабильности в озерах Самарской Луки (рис. 1) прежде всего показывает, что межгодовые колебания стабильности в них, за исключением оз. Б. Шелехметское, не очень велики. В последнем озере стабильность значительно увеличилась в 2002 и 2003 гг., по сравнению с 1999 г., а ее вертикальная структура в разные годы была крайне вариабельной. Это, видимо, связано с сильно менявшейся от года к году проточностью и уровнем режимом озера.

В моменты существования поверхностного термоклина наибольшая стабильность наблюдалась именно в поверхностном слое (рис. 1-3). Ее величины были значительны даже в мелких озерах, например, в оз. Клюквенное с глубиной только 1,5 м, в котором значения стабильности поверхностного слоя воды в июле 1999 г. в условиях массового развития фитопланктона достигали $2,6 \cdot 10^{-2} \text{ сек}^{-2}$. Однако и в отсутствие вторичного термоклина стабильность поверхностного слоя была высокой, изменяясь в пределах 20-80% величины в максимуме стабильности. Эти

данные свидетельствуют об отсутствии свободного перемешивания эпилимниона в значительной части озер. Впрочем, поскольку температурные профили определялись в дневное время (обычно в 10-12 часов по астрономическому времени), нельзя исключить возможности ежедневного перемешивания поверхностного слоя водной массы в период его ночного охлаждения.

В некоторых озерах (например, в оз. Подгорское; рис. 1А, Б) в придонном слое наблюдалась инверсия температуры, не компенсируемая увеличением минерализации, и придонный слой, судя по отрицательной величине стабильности, был механически неустойчивым. Этот результат, предположительно, объясняется недоучетом каких-то факторов, увеличивающих плотность воды придонного слоя, в частности, содержания взвешенных веществ и, предпочтительно, растворенной углекислоты.

Общая стабильность озер определяется как работа, которую необходимо совершить для перевода озера в нестратифицированное состояние без теплообмена со средой, в расче-

те на единицу его поверхности. Несмотря на высокие значения N^2 , общая стабильность исследованных озер невелика. Она не превышает 22 Дж/м² в оз. Бездонном, 6-6,5 Дж/м² – в озерах М. Карстовое, Харовое, Подгорское и Б. Шелехметское, и еще меньше – в других озерах Самарской Луки. Низкая величина общей стабильности связана с тем, что эта величина, при прочих равных условиях (одинаковой геометрии озерной котловины и подобном распределении плотности воды), пропорциональна квадрату глубины водоема. Тем не менее, сезонные наблюдения на озерах Бездонное и М. Карстовое показали, что они непрерывно остаются стратифицированными с мая по август, т.е. на протяжении половины безледного периода.

Изменения величин N^2 и общей стабильности в оз. Бездонное в течение периода наблюдений в 2002 г. показаны на рис. 3. Видно, что величина общей стабильности низка в апреле, затем возрастает и остается высокой до начала августа. В сентябре-октябре стабильность снижается до 0, что отражает полное перемешивание озера в этот период.

Формирование поверхностного термоклина и связанная с ним стабилизация поверхностного слоя воды в июле не привели к существенному увеличению общей стабильности по сравнению с июнем, когда поверхностный термоклин отсутствовал. Основной вклад в общую стабильность стратификации озера вносил именно главный термоклин, располагавшийся на глубине 1-2 м.

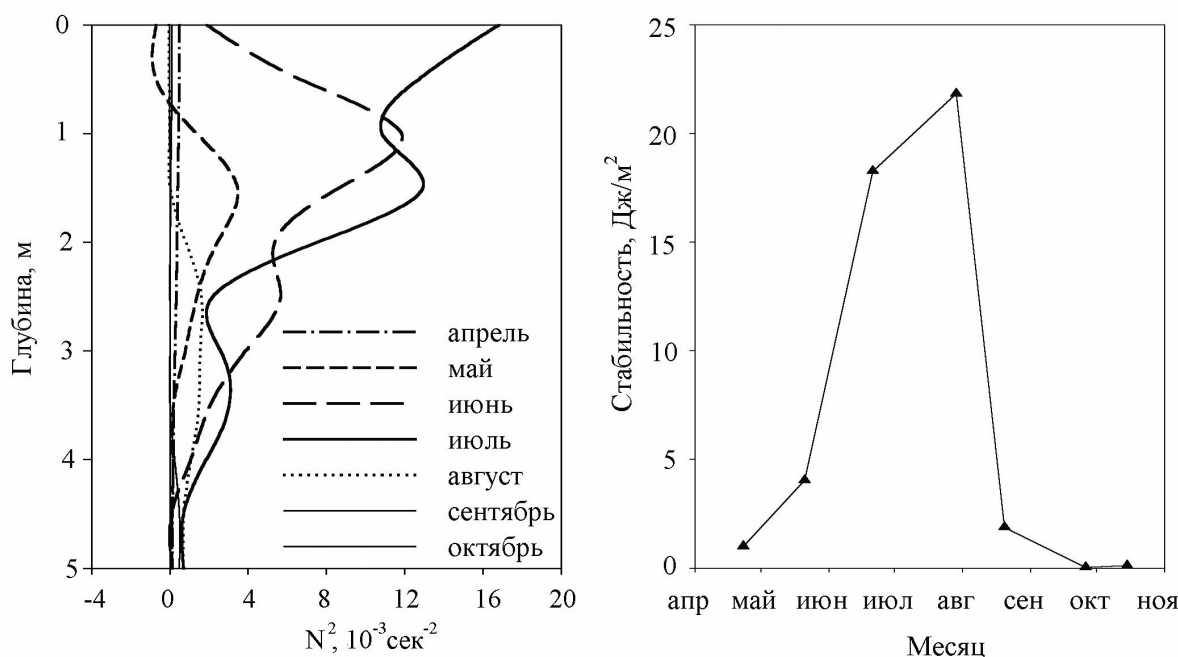


Рис. 3. Изменение вертикальной стабильности столба воды (А) и общей стабильности в оз. Бездонное (2002 г.)

Величина общей стабильности, сама по себе, не позволяет судить о степени устойчивости стратификации, поскольку доля энергии ветра, которая может использоваться на перемешивание водоема, зависит от его геометрических характеристик. Свободную от этого недостатка оценку устойчивости стратификации водоема дает так называемое число Ведденбурна W , в виде

$$W = \frac{\Delta \rho g z_{\text{mix}}^2}{\rho (u^*)^2 L},$$

где z_{mix} – мощность перемешиваемого слоя, $\Delta \rho$ – разность плотностей воды поверхностного слоя и слоя ниже термоклина, u^* – скорость сдвига воды, обусловленная действием ветра (shear velocity, не равна поверхностной горизонтальной скорости), L – длина ветрового усилия [21, 24]. При $W > 1$ водоем остается стратифицированным, и, напротив, при $W < 1$ плотностная стратификация недостаточна для предотвращения быстрого перемешивания. В работе [21] число Ведденбурна исполь-

зуется для оценки мощности перемешиваемого слоя при данном распределении плотностей воды и данной скорости ветра. Можно, однако, применить иной подход, оценив скорость ветра, достаточную для полного перемешивания водоема, т.е. для условия $z_{mix} = z_m$ (максимальная глубина). Приняв, что $u^* = U/800$, где U – скорость ветра [21, 24], для условия $W > 1$ получим:

$$U < U_t = 800z_m \sqrt{\frac{\Delta\rho g}{\rho L}}.$$

Полученную величину U_t можно назвать *критической* или *пороговой*, скоростью ветра, при которой озеро с данными характеристиками ($\Delta\rho$, L , z_m) останется стратифицированным. В табл. 2 приведены значения U_t , рассчитанные для некоторых из исследованных озер в летний период. Высокие значения этой величины в большинстве озер показывают, что стратификация в них действительно устойчива.

Эта оценка несколько завышена, поскольку после перемешивания почти всего объема озера плотность поверхностного слоя воды увеличится, а $\Delta\rho$, соответственно, уменьшится. Для более строгой точную оценки можно было бы заменить $\Delta\rho$ на $\Delta\rho_{max} - \Delta\rho_{av}$, где $\Delta\rho_{max}$ – максимальная плотность (в придонном слое), а $\Delta\rho_{av}$ – средняя плотность в озере, определенная по той же формуле, что и при расчете общей стабильности. Однако это требует знания батиметрических профилей озера и вертикального профиля плотности и сильно усложняет вычисления.

В большинстве исследованных озер, наряду с термическим расслоением, отмечается заметная разница минерализации воды поверхностного и придонного слоев и, следовательно, присутствует вертикальный градиент минерализации. В озерах Самарской Луки, которые исследовались в течение всего сезона открытой воды, этот градиент исчезает в период осеннего перемешивания. Примером этого может служить динамика минерализации воды в оз. Бездонное (рис. 4). Видно, что уже в апреле поверхностный слой значительно опреснен по сравнению с придонным, и различие минерализации сохра-

няется до начала полного перемешивания озера в сентябре. Осенью минерализация всей водной толщи становится близкой к минерализации придонного слоя озера в весенний период.

В других озерах, с большим градиентом минерализации поверхностного и придонного слоев, связанные с ним различия плотности могут быть достаточны для предотвращения перемешивания даже при отсутствии температурного градиента. Без учета температурной составляющей градиента плотности, и приняв, что плотность воды линейно увеличивается с увеличением ее минерализации с коэффициентом $\Delta\rho/\Delta M = 0,85$ [16], можно преобразовать формулу для U_t следующим образом:

$$U_{tm} = 73,05z_m \sqrt{\frac{\Delta M}{L}},$$

где ΔM – разность минерализации придонного и поверхностного слоев воды ($\text{кг}/\text{м}^3$).

Эту формулу можно использовать, чтобы оценить, достаточно ли различия минерализации в озере для предотвращения его перемешивания в период гомотермии, т.е. является ли озеро меромиктическим.

Рассчитанные таким образом значения U_{tm} показаны в табл. 2. В некоторых наиболее минерализованных озерах (Нижний пруд Ботанического сада СамГУ, Гудронное № 2, Стрельные № 5 и 8, Зерекликуль и № 3 в бассейне р. Ик) значения U_{tm} превышают 15-20 м/сек. Это указывает на невозможность полного перемешивания этих озер (меромиктию), или, во всяком случае, на возможность пропуска весеннего или осеннего перемешивания в зависимости от метеорологических условий конкретного года. Последнее соответствует озерам с нерегулярным перемешиванием [10], или так называемой «ограниченной меромиктией». В случае Нижнего пруда Ботанического сада СамГУ меромиктический характер перемешивания подтверждается прямыми ежемесячными наблюдениями [3].

Наиболее важным с экологической точки зрения последствием стратификации, является неоднородность химического состава воды разных горизонтов озер вследствие их

Таблица 2. Величины критической скорости ветра, необходимой для полного перемешивания озер, рассчитанные с учетом стратификации по температуре и минерализации (U_t) и только по минерализации (U_{tm}).

Озеро	Б. Шелекметское			Клюквенное	Подгорское		"Родниковое"		Бездонное		М.Карстовое	Золотенка	
	16.07.99	01.07.02	01.07.03	01.07.99	01.07.99	01.10.99	01.07.03	29.07.02	19.08.02	29.07.02	11.07.01	01.07.03	
U _t	25,5	39,1	30,3	5,6	23,2	3,9	27,8	108,8	32,5	98,9	63,0	39,4	
U _{км}	4,5	10,8	7,9	0,5	6,1	3,9	5,0	14,0	12,2	8,4	3,0	0	
Озеро	Харовое	Сосново-Солонецкий пруд		Пруд БС		Гудронные			Стрельные			№ 8	
		Июль 02	Май 01	Июль 01	2004-2005	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6		№ 7
U _t	34,8	21,0	14,8	53,3	76,1	68,2	13,5	10,3	57,5	19,0	25,4	56,0	
U _{км}	1,4	5,0	0,3		9,1		1,0	1,5		1,6	2,6		
Озеро	Кзылган	Лебяжье	"Моховое"			Озера в басс. р. Ик			Зерекли-куль	Голубое-3			
			Басс. 1	Басс. 2	Басс. 3	№ 3	№ 4	№ 5		Сент. 2004	Май 2005		Июнь 2005
			Июль 2005										
U _t	0,9	8,2	11,5	65,4	45,9	114,5	16,7	32,2	29,6	2,2	41,2	44,4	
U _{км}	0	0,5	2,7		14,8		1,7	7,9		0	14,3		

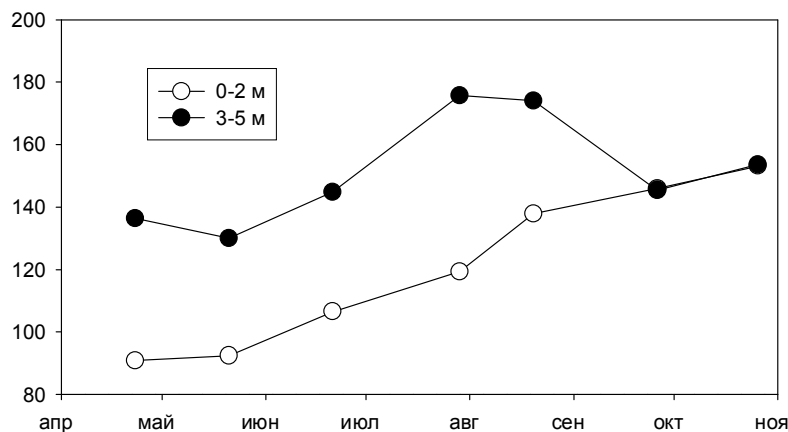


Рис. 4. Изменение минерализации эпи- и гипоплимниона в оз. Бездонное, 2002 г.

неперемешивания. Наиболее ярко это проявляется в различиях концентраций не главных ионов, составляющих основу минерализации воды, а микроэлементов, в частности, биогенных элементов и растворенных газов, в первую очередь кислорода. Потребление кислорода в афотических слоях гипоплимниона в условиях только диффузионного массообмена с вышележащими слоями может приводить к аноксии и накоплению продуктов анаэробного бактериального дыхания — сульфидов, ионов Fe(II) и метана [4, 5, 10].

Ни в одном из водоемов юго-восточной части Самарской Луки, исследованных в 1999 г., судя по результатам анализов, не наблюдалось аноксических явлений в придонном слое. В 2002-2003 гг. придонный слой двух из этих озер, Б. Шелехметское и Подгорское, был лишен кислорода и содержал небольшие количества сульфидов. В карстовых озерах Жигулевской возвышенности, а также в большинстве озер бассейнов рек Сок и Ик в гипоплимнионе происходит полное исчерпание кислорода и образование сероводорода вследствие процессов анаэробного (сульфатного) дыхания, а также, возможно, гнилостной деструкции биогенного осадочного материала. На рис. 5 показано распределение веществ в водном столбе двух из исследованных озер. Видно, что не только состав растворенных газов, но и концентрации биогенных элементов в эпи- и гипоплимнионе озера значительно отличаются. Концентрации фосфора, аммония и железа в гипоплимнионе значительно выше, чем в вышележащих слоях.

Обсуждение

Практически все исследованные озера с глубиной более 2 м в летний период находятся в состоянии устойчивой стратификации. Критические скорости ветра, рассчитанные для этих озер, в июле, в период максимального прогрева, превышают 25 м/сек, а в некоторых — даже 100 м/сек. Для сравнения, средняя скорость ветра с марта по ноябрь, по средним многолетним данным метеостанции г. Тольятти, составляет 4,7 м/сек, а максимальная — 20 м/сек [12]. Таким образом, ветровое перемешивание озер в этот период крайне маловероятно без предварительного охлаждения поверхностного слоя.

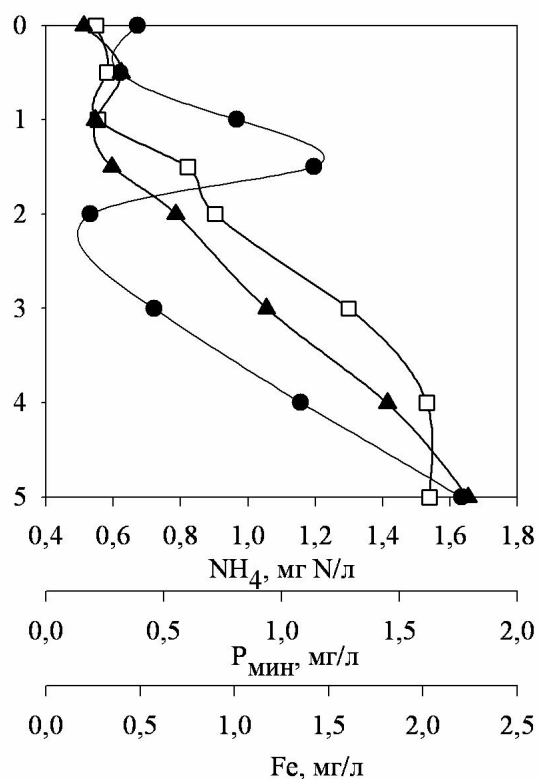
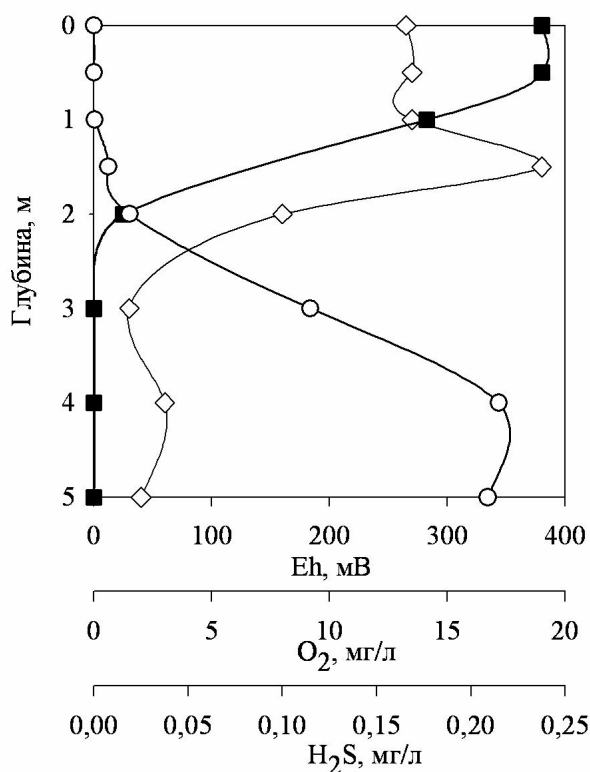
Теоретические соображения, однако, приводят к выводу о том, что при обычных скоростях ветра озера со средней глубиной менее 3 м, как правило, не могут перейти в состояние устойчивой стратификации [21]. Поэтому, очевидно, существуют какие-то факторы, которые способствуют первоначальному установлению стратификации в этих озерах после разрушения ледового покрова.

Одним из них может быть опреснение поверхностных водных масс в весенний период. Весеннее опреснение поверхностного слоя обусловлено таянием ледового покрова (мощностью 60-80 см), объем которого, из-за относительно небольшой максимальной глубины озер, составляет значительную часть их общего объема. Дополнительным источником опресненных вод является поступление талых вод с водосбора. Возможно, в озерах с высокой минерализацией воды градиент

плотности, образующийся из-за опреснения поверхностного слоя, препятствует циркуля-

ции озер уже с момента разрушения ледового покрова.

А



Б

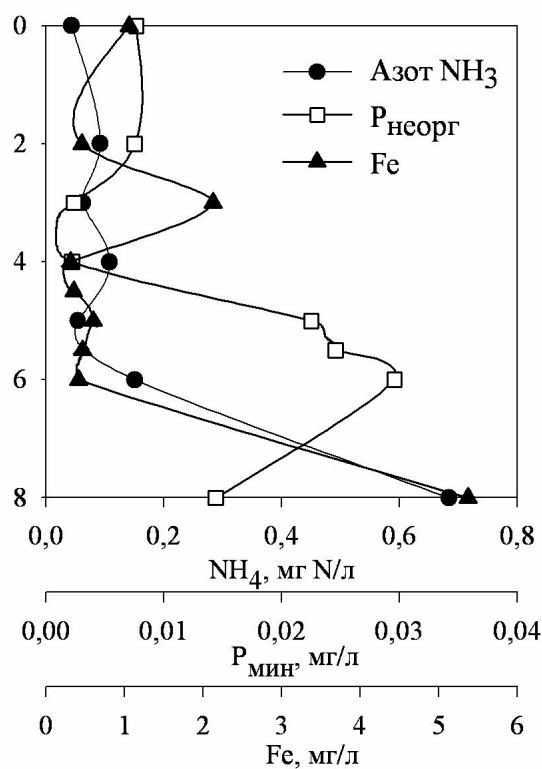
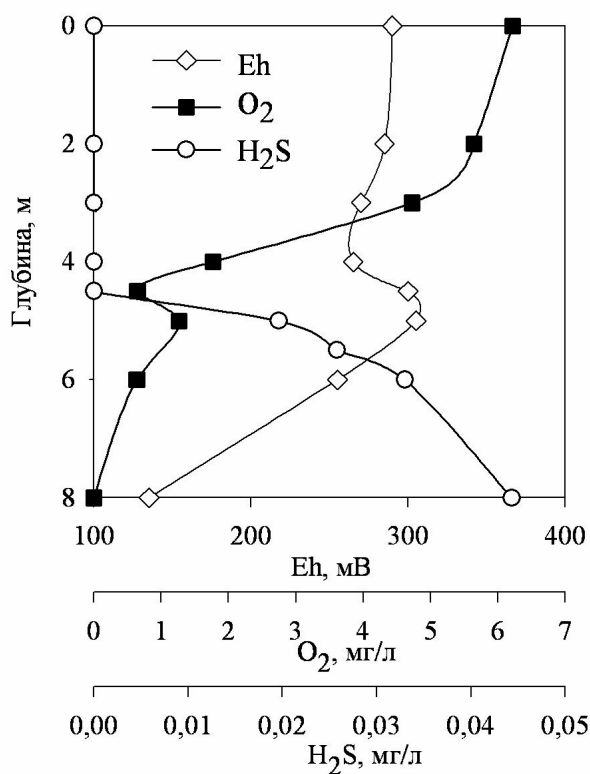


Рис. 5. Вертикальные профили окислительно-восстановительного потенциала, концентраций кислорода, сероводорода, минерального фосфора, железа и аммония в водном столбе оз. Бездонное 21.06.2002 г. (А) и озера № 3 в бассейне р. Ик 04.07.2005 г. (Б)

Кроме того, высокая продуктивность приводит к интенсивному весеннему развитию фитопланктона. В апреле, почти сразу после вскрытия, концентрация хлорофилла *a* во многих озерах превышает 10 мкг/л [9], а прозрачность практически во всех озерах менее 1 м, чаще – 0,5–0,6 м. В результате этого вся световая энергия, поступающая в водоем, поглощается в относительно узком приповерхностном слое, который поэтому быстро и интенсивно прогревается. В то же время, защищенность многих из озер высокими берегами или окружающей растительностью ограничивают скорость ветра над водной поверхностью, и вызванный им конвекционный перенос тепла из поверхностного горизонта озер в их придонные слои.

Все упомянутые факторы продолжают действовать и после установления стратификации. Низкая прозрачность воды ограничивает поступление солнечного излучения в гипolimнион и, тем самым, снижает скорость его прогрева. В то же время, нагрев поверхностного слоя озер способствует образованию вторичного, поверхностного термоклина в периоды низкой скорости ветра или штилевой погоды.

За исключением озер с очень низкой минерализацией, тот или иной вклад в общую устойчивость вносит также плотностное расслоение столба воды. Наряду с весенним опреснением поверхностной водной массы, в некоторых озерах оно может поддерживаться донными родниками. Прямые свидетельства их существования в исследованных озерах отсутствуют, но увеличение минерализации, наблюдавшееся с мая по август в оз. Бездонное (рис. 4), может быть связано с притоком высокоминерализованной воды из донных родников. Их наличие весьма вероятно в озерах с поверхностным стоком, как, например, Б. Шелехметское и Голубое-3.

Определенный вклад в поддержание градиентов минерализации в исследованных озерах вносят и биотические процессы. В высокопродуктивных озерах, к которым относится большинство исследованных водоемов, в придонные слои поступает большое количество отмерших и отмирающих планк-

тонных организмов и их фрагментов. Увеличение рН воды в период цветения фитопланктона в озерах с высокой карбонатной жесткостью может вызывать образование осадка карбоната кальция [23]. Растворение этих осадков в придонном слое за счет микробиологических и химических процессов приводит к увеличению минерализации придонного слоя воды.

Образующиеся градиенты минерализации в большинстве озер недостаточны для полного предотвращения перемешивания водной толщи в период осенней гомотермии, и их минерализация в это время выравнивается по всему столбу воды, как в оз. Бездонное (рис. 5). Однако наши расчеты (табл. 2) показывают, что в нескольких озерах для полного перемешивания воды в период гомотермии требуются весьма высокие скорости ветра, которые очень редки в нашем регионе. Поэтому в этих озерах весьма вероятно если не многолетнее неперемешивание придонного слоя (меромиктия), то, во всяком случае, спорадические пропуски полного перемешивания в периоды гомотермии в те или иные годы («ограниченная меромиктия» = «нерегулярная голомиктия»). Можно предполагать, во всяком случае, что градиенты минерализации, связанные с опреснением поверхностного водного слоя после таяния льда, ограничивают кратковременное весеннее перемешивание в некоторых озерах, что позволяет говорить об *элементах* меромиктии. В Нижнем пруду Ботанического Сада Самарского университета меромиктический характер перемешивания в 2005–2006 гг. подтвержден прямыми наблюдениями, хотя в период осенней гомотермии положение хемоклина в этом водоеме понижается, и объем монимолимниона, соответственно, сильно сокращается. Косвенным свидетельством длительного существования меромиктии в пруду является аномально высокое содержание сероводорода в придонном слое, характерное для меромиктических водоемов. В других водоемах с высокими значениями $U_{\text{м}}$ долговременные исследования не проводились, и поэтому вопрос о меромиктическом характере их перемешивания остается открытым.

Следствием высокого трофического статуса водоемов является высокая скорость потребления кислорода в афотических слоях воды и грунтах. В условиях, когда перемешивание водного столба подавлено, потребление кислорода в высокопродуктивных озерах не компенсируется его поступлением из вышележащих слоев, в результате чего происходит его быстрое исчерпание.

Отсутствие кислорода влечет за собой перестройку микробного сообщества, в котором начинают доминировать организмы с анаэробным метаболизмом [4, 5, 10]. Пока водная масса озер аэробна, биологические окислительно-восстановительные циклы серы и железа ограничены бентосным биотопом. После исчерпания кислорода в гипolimнионе, восстановленные продукты анаэробного дыхания свободно диффундируют в водную толщу, и процессы их окисления протекают уже на границе аэробной и анаэробной водных масс.

Стратификация ограничивает быстрый конвективный подъем в поверхностные слои воды биогенных элементов, углекислоты и продуктов неполного окисления органических веществ, поступающих в гипolimнион в результате седиментации сестона. С начала стратификации и до момента ее разрушения поверхностный слой обедняется, а гипolimнион, напротив, обогащается этими веществами. Кроме того, восстановление железа приводит к увеличению растворимости фосфатов, и их мобилизации из грунтов в придонные слои.

В результате, стратификация приводит к формированию вторичных градиентов ряда биологически значимых веществ, и тем самым создает сложную вертикальную структуру экологических ниш. Надо отметить, что любой градиент, как температурный, так и химический, не может быть бесконечно узким из-за диффузионных процессов [16, 26]. Как правило, мощность термо- и хемоклина составляет не менее 1-1,5 м. Однако если для глубоких озер слой такой мощности составляет только небольшую часть водной толщи водоема, и, соответственно, в биоценозах преобладают организмы эпи- и гипolimни-

она, то в малых озерах он охватывает его значительную часть. Эта особенность малых лесостепных стратифицируемых озер оказывает значительное влияние на состав и структуру населяющих их биоценозов [1-3].

Заключение

Наиболее яркие особенности режима перемешивания исследованных малых водоемов – это (1) устойчивая стратификация водоемов с небольшой максимальной глубиной, начиная с 2 м, и (2) высокая летняя стабильность значительной части водной массы, высокий относительный объем металимниона, слабое развитие или полное отсутствие поверхностного изотермического слоя. Они в значительной мере обусловлены именно особенностями лесостепной зоны и континентальным климатом региона Среднего Поволжья. В первую очередь, на характер стратификации исследованных озер влияет (1) большая, по сравнению со степной зоной, защищенность водоемов лесостепной зоны от ветрового воздействия; (2) высокая продуктивность наземных экосистем водосбора, которая, как известно, определяет продуктивность водоемов [13] и (3) длительный, более 4 мес., ледовый период с значительной толщиной ледового покрова в сочетании со средней и высокой минерализацией многих озер.

Интересным вопросом в связи с настоящей работой является возможное изменение режима перемешивания озер в результате глобального изменения климата. В лесостепном регионе Поволжья потепление может привести к сокращению ледового периода и снижению толщины ледового покрова на водоемах. Кроме того, оно, видимо, приведет к удлинению периодов весенней и осенней гомотермии. Поэтому вполне вероятно, что роль градиентов минерализации в формировании стратификации в озерах региона снизится по сравнению с современным состоянием. Неясно, правда, насколько эти изменения будут скомпенсированы увеличением температурной составляющей стратификации, связанным с возрастанием средней летней температуры. Во всяком случае можно

ожидать восстановления регулярного перемешивания в озерах с частичной и длительной меромиктией.

Современный же характер стратификации в исследуемых озерах приводит к значительным отличиям их сообществ от сообществ как полимиктических малых водоемов, так и более крупных водных объектов. При исследовании только поверхностного горизонта озер эти отличия менее выражены и часто остаются незамеченными. Однако при детальном

исследовании озер становится ясным, что максимумы биомассы многих гидробионтов и наиболее важные биологические и биогеохимические процессы в водной толще этих озер сосредоточены именно в области термо- и хемоклина.

Автор выражает искреннюю благодарность д.б.н. В.В. Жарикову и к.б.н. М.В. Уманской за обсуждение результатов и критические замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубая книга Самарской области / Ред. Г.С. Розенберг, С.В. Саксонов. Самара: СамНЦ РАН, 2007.
2. Горбунов М.Ю., Быкова С.В., Уманская М.В., Жариков В.В. Роль миксотрофных простейших и аноксигенных фотосинтезирующих бактерий в фототрофном сообществе небольших стратифицированных эвтрофных озер // Материалы междунар. конф. «Первичная продукция водных экосистем». Ярославль, 2004.
3. Горбунов М.Ю., Уманская М.В., Краснова Е.С. Характеристика абиотических условий в экосистеме Нижнего пруда Ботанического сада Самарского университета // Самарская Лука: Бюл. 2007. Т. 16. № 1-2 (19-20).
4. Горленко В.М., Дубинина Г.А., Кузнецов С.И. Экология водных микроорганизмов. М.: Наука, 1977.
5. Кузнецов С.И. Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность. Л.: Наука, 1970.
6. Новиков Ю.В., Ласточкина К.О., Болдина З.Н. Методы исследования качества воды водоемов. М.: Медицина, 1990.
7. Номоконова В.И., Горохова О.Г., Романова Е.П., Саксонов С.В. Гидрохимическая и гидробиологическая характеристика озер Жигулевского заповедника // IX Съезд Гидробиологического общества РАН: Тез. докл. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2006. Т. 2.
8. Поспелов А.П., Горбунов Ю.М., Уманская М.В., Поспелова М.Д. Характеристика гидрохимического режима водоемов Самарской Луки // Изв. Самар. НЦ РАН. 2000. Т. 2, № 2.
9. Розенберг Г.С., Паутова В.Н., Поспелов А.П. и др. Комплексная характеристика озер юго-восточного района Самарской Луки // Самарская Лука: Бюл. 2006. № 18.
10. Романенко В.И. Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоемах. Л.: Наука, 1985.
11. Уманская М.В., Горбунов М.Ю., Быкова С.В. и др. Общая характеристика некоторых водоемов Самарской Луки // Заповедное дело России: принципы, проблемы, приоритеты: Материалы междунар. науч. конф. Бахилова Поляна, 2003. Т. 1.
12. Шанеева Е.В. Город Тольятти: метеорологические аспекты экологической проблемы. Тольятти: ИЭВБ РАН, 1994.
13. Boullion V.V. Experience in prediction of water body productivity on the basis of geographical factors // Aquatic Ecology at the Dawn of XXI Century: Book of abstr. St-Petersburg, 2005.
14. Dawidowicz P., Prejs A., Engelmayer A. et al. Hypolimnetic anoxia hampers top-down food-web manipulation in a eutrophic lake // Freshwater Biol. 2002. V. 47.
15. Hakala A. Meromixis as a part of lake evolution – observations and revised classification of true meromictic lake in Finland // Boreal Environ. Res. 2004. V. 9, № 1.
16. Hutchinson G.E. A Treatise on Limnology. V. 1. Geography, Physics and Chemistry. John Wiley & Sons, 1957.
17. Idso S.B. On the concept of lake stability // Limnol. Oceanogr. 1973. V. 19, № 4.
18. Mortimer C.H. Lake hydrodynamics // Mitt. Intern. Ver. Limnol. 1974. V. 20.
19. Moss B., Beklioglu M., Carvalho L. et al.

- Vertically-challenged limnology; contrasts between deep and shallow lakes // *Hydrobiol.* 1997. V. 342/343.
20. *Nagy M.T., Marialigeti K., Vegvari P., Csepes E., Bancsi I.* Stratification analysis of the Ohalasz Ox-bow of the River Tisza (Kiskore Reservoir, Hungary) // *Hydrobiol.* 2003. V. 506-509. № 1-3.
21. *Padisak J., Reynolds C.S.* Shallow lakes: the absolute, the relative, the functional and the pragmatic // *Hydrobiol.* 2003. V. 506-509.
22. *Reynolds C.S.* The ecology of freshwater phytoplankton. Cambridge Univ. Press, 1984.
23. *Rodrigo M.A., Miracle M.R., Vicente E.* The meromictic Lake La Cruz (Central Spain). Patterns of stratification // *Aquat. Sci.* 2001. V. 63.
24. *Spiegel R.H., Imberger J.* Mixing processes relevant to phytoplankton dynamics in lakes // *New Zealand J. of Marine and Freshwater Res.* 1987. V. 21.
25. *Walker K.F., Likens G.E.* Meromixis and reconsidered typology of lake circulation patterns // *Verh. Intern. Ver. Limnol.* 1975. V. 19.
26. *Wetzel R.G.* Limnology. Philadelphia, London, Toronto: W.B.Saunders, 1975.
27. *Xenopoulos M.A., Schindler D.W.* The environmental control of near-surface thermoclines in boreal lakes // *Ecosystems.* 2001. V. 4.

VERTICAL STRATIFICATION OF WATER MASS IN SMALL LAKES OF FOREST-STEPPE REGION OF VOLGA BASIN

© 2007 M.Yu. Gorbunov
Institute of ecology of Volga basin RAS, Togliatti

Character of vertical temperature and chemical gradients in small eutrophic lakes of forest-steppe region of Volga basin is analyzed using data from more than 30 lakes of Samara region and Tatarstan. It is shown that in small eutrophic lakes of discussed region with area $<0.1 \text{ km}^2$ maximal depth required for development of stable summer stratification is 2.0-2.5 m. High relative volume of metalimnion is the feature of discussed lakes. The estimation of stratification stability based on the calculation of threshold wind speed required for its destruction is proposed. Formation of secondary gradients of chemical substances in small stratified eutrophic lakes and its consequences are discussed.