

ИССЛЕДОВАНИЕ БИОГЕННОЙ И АБИОГЕННОЙ ЧАСТЕЙ ВЗВЕСИ ДЕЛЬТЫ РЕКИ ВОЛГИ В ПЕРИОД ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ (МАЙ 2008 г.)¹

© 2013 г. М. Д. Кравчишина, А. Н. Новигатский, Н. В. Политова, В. В. Зернова,
С. А. Мошаров, О. М. Дара, А. А. Клювиткин

*Институт океанологии РАН
117997 Москва, Нахимовский просп., 36*

E-mail: kravchishina@ocean.ru

Поступила в редакцию 02.02.2011 г.

Проведены комплексные исследования рассеянного осадочного вещества (взвеси) в дельте р. Волги в период половодья на двух участках Астраханского государственного природного биосферного заповедника (Обжоровском и Дамчикском), выявлен ряд закономерностей условий седиментации. Обнаружены значительные различия в поставке в море осадочного материала с рукавами и протоками восточной и западной части дельты реки. Для восточной части характерны заметно более высокие концентрации взвеси, биогенных компонентов, фитопигментов, численности и биомассы фитопланктона, а также потоки осадочного материала. Установлена взаимосвязь между концентрациями взвеси и изучаемых фитопигментов. В мае практически весь хлорофилл “а” взвеси концентрировался в клетках мелких диатомовых водорослей. Его распределение было пропорционально биомассе диатомей. В целом взвешенное вещество дельты представлено преимущественно минеральными обломочными частицами (кварца и карбонатов) с относительно небольшой долей глинистых минералов на фоне огромного количества клеток диатомовых водорослей и биогенного детрита.

Ключевые слова: взвесь, фитопланктон, хлорофилл “а”, минеральный состав, потоки осадочного вещества

DOI: 10.7868/S0321059613010057

Самая крупная река в бассейне Каспийского моря – Волга имеет широкую и развитую дельту (площадь водосбора 1360–1380 тыс. км²) [16, 29]. Она заметно выделяется на фоне большинства речных дельт мира по ряду фундаментальных признаков [28]. На большей части бассейна реки идет довольно интенсивное химическое выветривание при значительном выпадении атмосферных осадков и относительно высокой среднегодовой температуре воздуха в ее среднем течении. В южной части водосборной площади, тяготеющей к зоне полупустынь, количество осадков незначительно, вследствие чего преобладает физическое разрушение пород и эоловая поставка продуктов выветривания [24]. Балансовые расчеты [20] по материалам Астраханского Центра по гид-

рометеорологии за 1987–1988 гг. показали, что на устьевом взморье отложение взвешенных наносов идет интенсивнее, чем в дельте реки.

В период половодья Волга сбрасывает в море большое количество взвешенных (70% годового твердого стока) и растворенных веществ. Во взвеси увеличивается количество минеральной компоненты, расширяются ареалы влияния речных вод. Именно с волжским стоком связывают возникновение первого максимума концентраций взвеси в Северном Каспии в апреле–мае. Со стоком Волги в северную часть моря в мае–июне в огромном количестве поступают биогенные вещества (БВ), необходимые для развития планктона [7]. Максимальные величины мутности наблюдаются в многоводные годы в июне, а в маловодные – в мае (на подъеме волны половодья) [8]. Громадный речной сток в значительной степени определяет осадконакопление в северной части моря.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 11-05-00456-а), Президента РФ (проект НШ-618-2012-5), а также ОНЗ РАН (проект “Микро- и наночастицы в морях, океанах, атмосфере и льдах. Потоки, состав, загрязнения на микро- и наночастицах”).

Регулирование стока р. Волги нарушило временной баланс между наступлением половодья и формированием соответствующего для этого сезона температурного режима вод [9]. Особое значение при этом имело завершение строительства нижней плотины у г. Волгограда в 1959 г. В мае (период половодья) наблюдается повышение температуры воды в водотоках дельты по сравнению с периодом естественного стока (1942–1958 гг.) [20]. Из-за существующего режима работы Волгоградской ГЭС зимний сток увеличился втрое, на соответствующую величину стока уменьшилось весенне-летнее половодье и вдвое сократилась его продолжительность [9]. Повышение и понижение уровня воды в половодье происходит гораздо быстрее по сравнению с незарегулированными условиями. Утренние пуски ГЭС, особенно интенсивные по понедельникам, приводят к ежедневным изменениям скорости течения и уровня воды, эрозии берегов (за счет ежедневного обсыхания и намочения), усиленному стоку в море вод, не полностью прошедших биологический фильтр дельты.

В результате зарегулирования речного стока непродолжительное и позднее половодье отрицательно сказывается на всех составляющих системы Северного Каспия. Количественные колебания фитопланктона в этой части моря зависят, главным образом, от колебания стока и высоты половодья р. Волги [22, 25]. Продуктивность фитопланктона в дельте зависит в основном от объема расхода воды, обусловленного работой Волгоградской ГЭС. Высокая первичная продукция наблюдалась в годы с высоким и средним значением годового расхода, а низкая – в годы с минимальными объемами пусков [3].

В дельте р. Волги и в Северном Каспии сочетаются процессы гумидной и аридной седиментации [24] при непосредственном значительном влиянии антропогенных факторов.

Для познания процессов современной седиментации в Северном Каспии авторами были проведены комплексные исследования взвешенного осадочного вещества в дельте р. Волги в период половодья, когда в море поступает наибольшее количество твердого речного стока.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Особенность дельты р. Волги – наличие обширного устьевое взморья, которое включает в себя авандельту (глубины до 1.5–2.5 м, протяженность с севера на юг 35–50 м) и приглубую зону (глубины 3–7 м, ширина ~70 км). Авандельта включает в себя две подзоны: островную и мор-

скую. Южной границей авандельты служит морской устьевой бар [2, 23]. Приустьевое пространство р. Волги охватывает наиболее опресненную часть Северного Каспия (0.1–3 епс). Работы авторов на взморье в период половодья (16–21 мая 2008 г.) не выходили за пределы области распространения пресных вод (рис. 1).

Исследования взвеси и планктона проводились на территории Астраханского государственного природного биосферного заповедника (одного из старейших в России, основанного в 1919 г.) в западной (Дамчикский участок) и восточной (Обжоровский участок) частях дельты. Это сравнительно молодая часть дельты, где взаимодействуют факторы речного и морского дельтообразования [2].

Наиболее изучен Дамчикский участок, который разделяется на две разные по географическим условиям части: северную и южную. Северная часть относится к нижней зоне надводной дельты. Она протягивается от устьев водотоков в направлении вершины дельты на 10 км и включает в себя многочисленные аллювиальные острова, разделенные узкими протоками и ериками. Южная часть относится к предустьевой области подводной дельты – островной авандельте. Для нее характерно наличие обширных мелководий с надводной и подводной растительностью (зарослями тростника, рогоза, ежеголовника, лотоса и др.), открытых и изолированных заливов (култуков) [2].

Обжоровский участок заповедника также можно разделить на две части: северную (надводная часть дельты) и южную (авандельта с плавающей и погруженной растительностью). В восточной части дельты находятся основные естественные нерестилища полупроходных рыб. В западной части таких нерестилищ мало. В основном там располагаются сельскохозяйственные угодья [2].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Пробы воды отбирали винипластовым батометром объемом 5 л, затем воду разливали в пластиковые бутылки. Для определения хлорофилла “а” пробы после отбора сразу помещали в темное прохладное место (сумка-холодильник) и хранили не более 3 ч до начала анализа.

Для сбора взвеси, определения ее массовой концентрации, мг/л, и последующего изучения ее состава использовались мембранные ядерные фильтры диаметром 47 мм и размером пор 0.45 мкм. Фильтрация проб воды объемом от 300 до 500 мл (в зависимости от количества взвеси) проводилась под вакуумом 0.4 атм. С каждой пробы воды

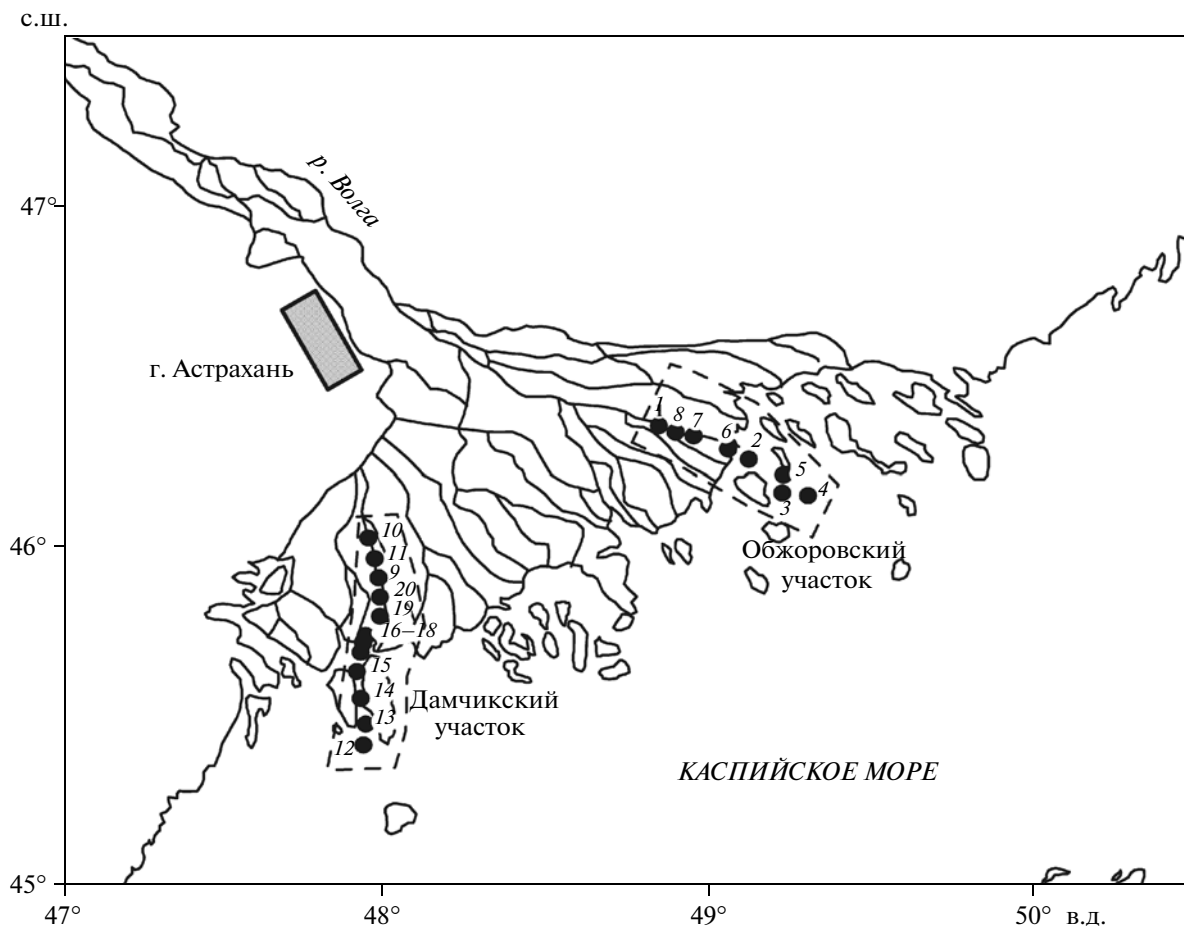


Рис. 1. Карта-схема станций отбора проб воды в дельте р. Волги в мае 2008 г. 1–20 – номера станций.

было получено по три параллельных ядерных фильтра. Фильтры помещали в чашку Петри и сушили при $t = 60^\circ\text{C}$. Высушенные фильтры выдерживали в эксикаторе, затем взвешивали на электронных весах (с точностью до пятого знака после запятой) и рассчитывали среднюю концентрацию взвеси для каждой пробы. В результате собрано 39 проб взвеси (117 фильтров) на 35 станциях.

Определение концентрации пигментов фитопланктона (хлорофилла “а” и феофитина “а”) проводилось флуориметрическим методом [27] с помощью флуориметра “Trilogy” (фирма “Turner”), предварительно откалиброванного на кафедре биофизики биологического факультета МГУ. Для калибрования прибора использовался раствор хлорофилла “а”, концентрация которого была определена спектрофотометрически.

Пробы воды для определения пигментов фитопланктона фильтровали через стекловолоконистые фильтры GF/F фирмы “Whatman” под вакуумом 0.2 атм. Объем отфильтрованной воды варьировал от 100 до 250 мл. Фильтры помещали в 90%-й аце-

тон для проведения экстракции хлорофилла “а” при $t = +4^\circ\text{C}$ в темноте в течение 12–16 ч. Полученные экстракты помещали в измерительную кювету флуориметра и определяли интенсивность флуоресценции. Для коррекции концентрации хлорофилла “а” с учетом феопигмента экстракт подкисляли 1 н HCl и снова определяли интенсивность флуоресценции. Расчет концентраций хлорофилла “а” и феофитина “а” проводился по данным флуоресценции по формулам в [26, 31]:

$$\text{Chl-a} = kn(Fb - Fa)(V_{\text{solvent}}/V_{\text{water}}), \quad (1)$$

$$\text{Phaeo-a} = kn(FmFa - Fb)(V_{\text{solvent}}/V_{\text{water}}), \quad (2)$$

где k – калибровочный коэффициент [$C_{\text{stand}}/Fb_{\text{stand}}$]; n – коэффициент подкисления [$Fm/(Fm-1)$], $Fm = Fb_{\text{stand}}/Fa_{\text{stand}}$; C_{stand} , Fb_{stand} и Fa_{stand} – концентрация и флуоресценция стандартного раствора хлорофилла “а” до и после подкисления соответственно; Fb и Fa – флуоресценция опытного раствора хлорофилла “а” до и после подкисления соответственно; V_{solvent} – объем ацетонового экстракта; V_{water} – объем пробы воды.

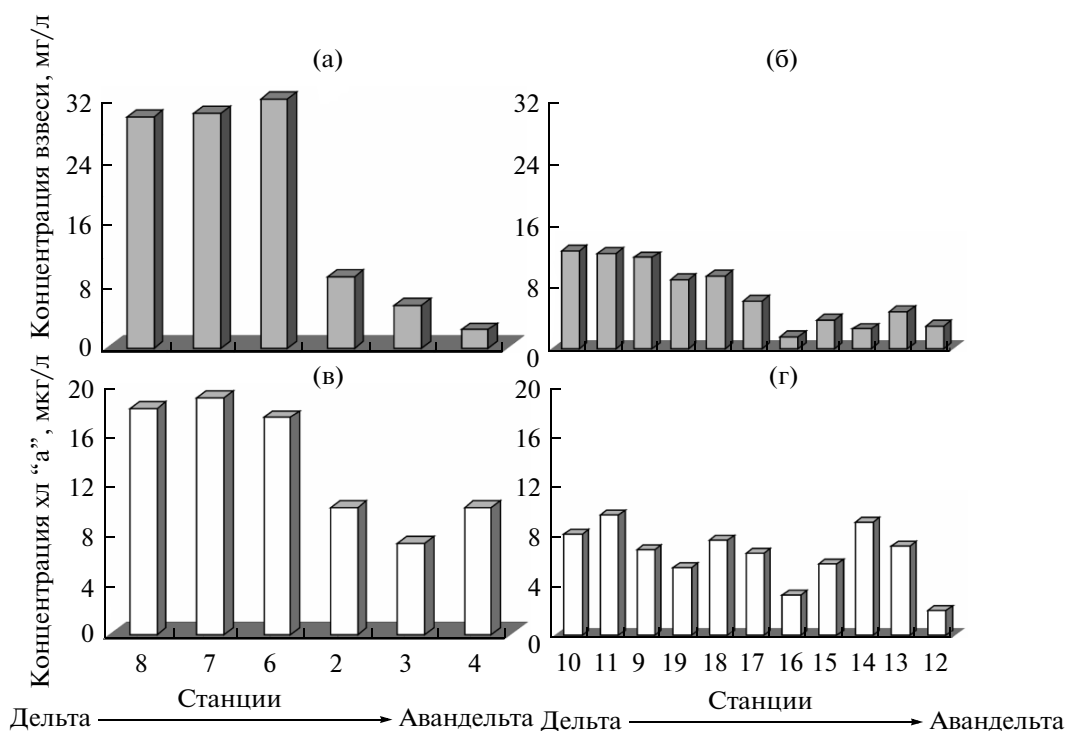


Рис. 2. Гистограммы распределения концентрации взвеси и хлорофилла “а” на Обжоровском (а, в) и Дамчикском (б, г) разрезах в дельте р. Волги в мае 2008 г.

Проведена оценка изменения концентрации хлорофилла “а” и феопигмента при хранении проб волжской воды. В четырех пробах вполне измерение непосредственно после отбора и через 3 ч после хранения проб в темном прохладном месте. Установлено, что концентрация пигментов в таких условиях варьировала в пределах 3–13% и зависела от времени хранения проб и величины концентрации пигментов. В пробах с высокой концентрацией хлорофилла “а” (>15 мкг/л) в результате хранения его концентрация возрастала на 2 мкг/л, а в водах с относительно низкой концентрацией (<10 мкг/л) — лишь на 0.3 мкг/л. В целом хранение проб воды при их транспортировке в лабораторию существенно не сказывалось на достоверности результатов.

Во время экспедиции собрано с поверхности 10 проб фитопланктона. Пробы объемом 250 мл фиксировали формалином. При просмотре материала под микроскопом просчитывали 2–4 ряда в камере на 0.05 см³ (очень небольшую часть из-за массового развития водорослей).

Минеральный состав взвеси изучен с помощью рентгенографического полуколичественного фазового анализа. Определение основных компонентов химического состава проб взвеси — Si, Al и P — проводилось фотометрическим методом по методике [1], разработанной в Институте гео-

химии и аналитической химии РАН в модификации А.Б. Исаевой (Институт океанологии (ИО) РАН). Точность ошибки метода составляет ±15%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Концентрация взвеси

Концентрация взвеси в исследованной части дельты и авандельты в период половодья (май 2008 г.) варьировала в широких пределах — от 1.5 до 41.1 (в среднем 13.6) мг/л (табл. 1). Средняя концентрация взвеси в протоках и култушной зоне — 16 мг/л [11], что на порядок ниже средней для рек мира (460 мг/л [4]).

На предустьевом пространстве моря по сравнению с протоками дельты концентрации уменьшались примерно в три раза — от 2 до 9 (среднее 5) мг/л. Прозрачность воды по диску Секки вследствие большого количества выносимого глинистого материала колебалась от 0.9 м в протоках до 1.9 м на взморье. Цвет воды во время половодья и сильного волнения — обычно желтовато-коричневый, в остальное время — желтовато-зеленый [24].

Высокие концентрации взвеси (>20 мг/л) — в восточной части дельты на Обжоровском участке. На морском краю дельты при выходе из протоки Кутум (область зарастания) они повышают-

Таблица 1. Станции отбора проб, концентрация взвеси и пигментов фитопланктона в дельте р. Волги, май 2008 г. (прочерк – отсутствие данных)

Станция		Дата–время	Координаты		Глубина	Горизонт	Концентрация взвеси, мг/л	Хлорофилл “а”	Феофитин “а”	Доля феофитина “а”, %
основная	суточная		°с.ш.	°в.д.						
Обжоровский участок										
1	–	16.05–21:15	46°18.18′	48°58.81′	3.0	0	16.4	–	–	–
2	–	17.05–10:40	46°14.82′	49°05.85′	1.0	0	9.1	10.2	3.5	26
3	–	17.05–11:00	46°13.77′	49°08.48′	2.0	0	5.5	7.3	3.6	33
4	–	17.05–11:20	46°13.82′	49°09.44′	1.8	0	2.3	10.2	3.5	26
5	–	17.05–11:40	46°15.22′	49°07.81′	3.5	0	41.1	17.0	4.5	21
6	–	17.05–12:00	46°14.90′	49°04.83′	2.5	0	31.8	17.4	2.7	13
7	–	17.05–13:00	46°18.00′	48°58.28′	4.0	0	30.0	19.0	3.1	14
8	–	17.05–13:10	46°18.19′	48°58.76′	3.0	0	29.6	18.1	4.1	18
8	1S-1	17.05–20:00	46°18.19′	48°58.76′	3.0	0	21.0	17.1	1.0	6
8	1S-1	17.05–20:00	46°18.19′	48°58.76′	3.0	2	18.6	16.1	2.1	12
8	1S-2	18.05–00:00	46°18.19′	48°58.76′	3.0	0	16.0	15.0	1.9	11
8	1S-3	18.05–04:00	46°18.19′	48°58.76′	3.0	0	18.7	14.9	2.4	14
8	1S-4	18.05–08:00	46°18.19′	48°58.76′	3.0	0	21.2	15.5	4.3	22
8	1S-5	18.05–12:00	46°18.19′	48°58.76′	3.0	0	15.2	17.0	1.4	8
8	1S-5	18.05–12:00	46°18.19′	48°58.76′	3.0	1.5	16.1	17.9	1.5	8
8	1S-6	18.05–16:00	46°18.19′	48°58.76′	3.0	0	12.3	23.1	0.3	1
8	1S-7	18.05–20:00	46°18.19′	48°58.76′	3.0	0	16.5	22.8	2.2	9
Дамчикский участок										
9	2S-1	19.05–20:00	45°47.52′	47°53.45′	3.0	0	6.6	7.5	3.9	34
9	2S-2	20.05–00:00	45°47.52′	47°53.45′	3.0	0	11.8	8.2	3.8	32
9	2S-3	20.05–04:00	45°47.52′	47°53.45′	3.0	0	11.0	7.8	4.6	37
9	2S-4	20.05–08:00	45°47.52′	47°53.45′	3.0	0	13.5	8.5	4.8	36
9	2S-4	20.05–08:00	45°47.52′	47°53.45′	3.0	3.5	14.8	8.9	3.8	30
9	2S-5	20.05–11:30	45°47.52′	47°53.45′	3.0	0	11.7	6.8	2.4	26
9	2S-5	20.05–11:30	45°47.52′	47°53.45′	3.0	0	10.8	7.6	3.4	31
9	2S-5	20.05–11:30	45°47.52′	47°53.45′	3.0	2.5	14.7	6.5	3.9	38
9	2S-6	20.05–16:00	45°47.52′	47°53.45′	3.0	0	9.6	8.2	4.6	36
9	2S-7	20.05–20:00	45°47.52′	47°53.45′	3.0	0	13.5	8.0	2.7	25
10	–	20.05–10:30	45°51.42′	47°54.27′	7.5	0	12.6	6.8	2.9	30
11	–	20.05–11:00	45°49.44′	47°53.78′	10.5	0	12.3	9.6	3.8	28
11	–	20.05–11:00	45°49.44′	47°53.78′	10.5	4	14.1	7.7	2.9	27
11	–	20.05–11:00	45°49.44′	47°53.78′	10.5	9	19.2	9.3	6.1	40
12	–	21.05–11:00	45°28.89′	47°56.25′	1.8	0	2.9	1.9	1.6	46
13	–	21.05–12:00	45°33.81′	47°54.79′	2.0	0	4.7	7.2	2.7	27
14	–	21.05–12:20	45°37.36′	47°54.58′	1.8	0	2.5	9.1	1.2	12
15	–	21.05–12:45	45°39.45′	47°53.52′	1.9	0	3.7	5.7	3.2	36
16	–	21.05–13:05	45°41.33′	47°53.86′	1.6	0	1.5	3.2	2.0	38
17	–	21.05–13:20	45°41.81′	47°53.77′	1.6	0	6.1	6.6	1.0	13
18	–	21.05–13:30	45°41.81′	47°53.37′	2.4	0	9.4	7.6	1.4	16
19	–	21.05–14:00	45°44.23′	47°53.36′	1.9	0	8.9	5.4	1.1	17
20	–	21.05–14:25	45°46.81′	47°52.45′	2.5	0	2.9	3.9	1.7	30

ся до 30 мг/л, а мористее (на более открытом пространстве) резко снижаются до 2 мг/л (рис. 2). Макрофиты служат естественным гидродинамическим барьером, способствующим снижению скорости речного потока и образованию так называемой “иловой пробки”, несмотря на то, что в апреле–мае наблюдается не столь значительное количество растительности. Максимальное ее накопление на взморье отмечается в августе–сентябре. Интенсивное зарастание отмелей зоны взморья началось с конца 1950-х гг. в связи со снижением уровня воды до критических отметок (–28 м) [17]. Бурное развитие водной растительности еще больше способствовало уменьшению динамической активности вод (течений, ветрового волнения, сгонно-нагонных колебаний уровня воды).

Максимальное значение концентрации взвеси (до 41 мг/л) обнаружено в районе судоходного канала (ст. 5). Здесь создаются условия для торможения руслового потока вторгающимися в него пойменными водами, имеющими меньшую скорость течения, а также формированием на границе двух потоков вихревых образований [17, 28]; это способствует возникновению очередного гидродинамического барьера, где происходит улавливание и осаждение взвеси на дно.

Заметно увеличение концентраций взвеси 17 мая (от 16 до 30 мг/л) на протяжении всего разреза в пределах Обжоровского участка. 16 и 18 мая они составляли <16 мг/л. Фиксировались значительные колебания мутности волжских вод в период половодья.

На суточной ст. 8 (Обжоровский участок) концентрации взвеси изменялись примерно в два раза: наиболее высокие значения отмечались в вечерние и ранние утренние часы. Аналогичные изменения мутности вод установлены на суточной ст. 9 (Дамчикский участок) – от 6.6 до 13.5 мг/л. По-видимому, эти колебания концентрации взвеси связаны с изменениями скорости и объема волжского стока вследствие пиковых попусков воды из водохранилищ.

На разрезе в западной части дельты реки концентрации взвеси уменьшались в четыре раза по направлению к устьевому взморью: от 12.6 до 2.9 мг/л. Кроме того, концентрации изменялись в несколько раз в пределах этого участка дельты в разных протоках и ериках. Средняя концентрация взвеси на разрезе составляла 5 мг/л, исключая станции 9, 10 и 11, где она достигала 12 мг/л.

Воды устьевой области р. Волги были хорошо перемешаны по вертикали. Тем не менее, наблюдалось повышение концентрации взвеси с глуби-

ной на 1–2 мг/л. В яме на ст. 11, где глубина достигала 10 м, концентрация взвеси увеличивалась от поверхности до дна от 12 до 19 мг/л. Это одна из естественных ловушек тонкого взвешенного осадочного вещества на пути его переноса в море. Здесь идет интенсивное осаждение и разложение органического вещества (ОВ) взвеси в анаэробной среде. В дночерпательной пробе осадков был обнаружен сильный запах сероводорода.

Только однажды в восточной части дельты (ст. 8) в период наиболее высокой мутности воды (17 мая) у дна отмечалось уменьшение концентрации взвеси по сравнению с поверхностными водами. В это время, вероятно, увеличились скорость и объем речного стока, соответственно возросла береговая эрозия.

Концентрация пигментов фитопланктона и их взаимосвязь со взвешенным веществом

В мае 2008 г. в дельте р. Волги концентрация хлорофилла “а” варьировала в широких пределах: от 1.9 до 23.1 мкг/л (табл. 1). Она была заметно выше значений, полученных в период летней межени – в июле–августе 1995 г. (1.1–13.0 мкг/л) [2]. Наиболее высокие концентрации (23.1 и 22.7 мкг/л) обнаружены 18 мая в глубине дельты на Обжоровском участке заповедника на суточной ст. 8 в вечерние часы (в 16:00 и 20:00 ч соответственно). Суточные вариации концентрации хлорофилла “а” в восточной части дельты выражены гораздо ярче, чем в западной. В целом, за исключением двух аномально высоких значений, превышающих 20 мкг/л, средняя концентрация хлорофилла “а” в воде составила 10.2 мкг/л. В восточной части дельты она была в два раза выше, чем в западной – 13.7 мкг/л на Обжоровском участке и 6.2 мкг/л – на Дамчикском. Эти значения косвенно указывают на более значительную биомассу фитопланктона в восточной части дельты по сравнению с западной.

Повышенные концентрации хлорофилла “а” отмечались в протоках дельты, а на приустьевом взморье они были заметно ниже, что, вероятно, отражает общее снижение численности и биомассы фитопланктона в водах авандельты (рис. 2). Однако мористее, в прибрежье авандельтовых островов могут быть выявлены участки как с пониженной, так и с повышенной концентрацией хлорофилла “а” [2].

На взморье, как и в протоках дельты, проследживается различие между восточной и западной частями дельты. Так, на Обжоровском участке дельты концентрация хлорофилла “а” в протоках была в два раза выше, чем на прилегающем взмо-

рье (рис. 2а). На Дамчикском участке уменьшение хлорофилла “а” на взморье столь ярко не выражено, что обусловлено влиянием многочисленных островов и зарослей макрофитов.

Вследствие интенсивного перемешивания на небольших глубинах в дельте р. Волги вертикальное распределение хлорофилла “а” было почти равномерным. В яме на ст. 11 увеличение концентрации взвеси у дна (глубина 9 м) сопровождалось возрастанием хлорофилла “а” до 9.3 мкг/л по сравнению с вышележащим горизонтом (на глубине 4 м – 7.7 мкг/л) и приближалось к значению концентрации у поверхности (9.6 мкг/л).

Пространственное распределение концентрации феофитина “а” было неоднородным, как и хлорофилла “а”. Он присутствует во всех пробах речной воды, это более стойкое по сравнению с хлорофиллом соединение. Во время половодья шло интенсивное развитие клеток диатомовых водорослей – это период их массового развития. Практически весь хлорофилл “а” взвеси концентрировался в клетках мелких диатомовых водорослей и находился там в активном состоянии. Доля феофитина “а” в общем содержании хлорофилла “а” и феофитина “а” в пределах дельты значительно варьировала: от 1 до 46% (табл. 1). В восточной части дельты ее среднее значение было в два раза ниже, чем в западной, так как в восточной части основная доля фотосинтетических пигментов приходилась на функциональный хлорофилл “а”. Между концентрацией хлорофилла “а” и долей феофитина “а” обнаружена удовлетворительная обратная линейная зависимость (рис. 3). Эта зависимость иллюстрирует различное состояние фитопланктонных сообществ в восточной и западной частях дельты, оно является следствием различных условий среды обитания. Только на станциях 2 и 3 на взморье восточной части дельты фитопланктонное сообщество по физиологическому состоянию приближается к сообществу западного участка.

Суточная динамика феофитина “а”, как и пространственная, также достаточно велика, особенно на Обжоровском участке. Максимальная доля феофитина “а” (до 46%) установлена в придонных водах ямы (ст. 11, глубина 9 м), где обнаружено наличие сероводорода, а также на ст. 12 на устьевом взморье Дамчикского участка. Это может указывать на неблагоприятные условия обитания фитопланктона, сложившиеся в этих водах и вызванные как естественными (орографическими и гидродинамическими) причинами, так и влиянием антропогенного загрязнения. Предполагается [27], что при неблагоприятных условиях

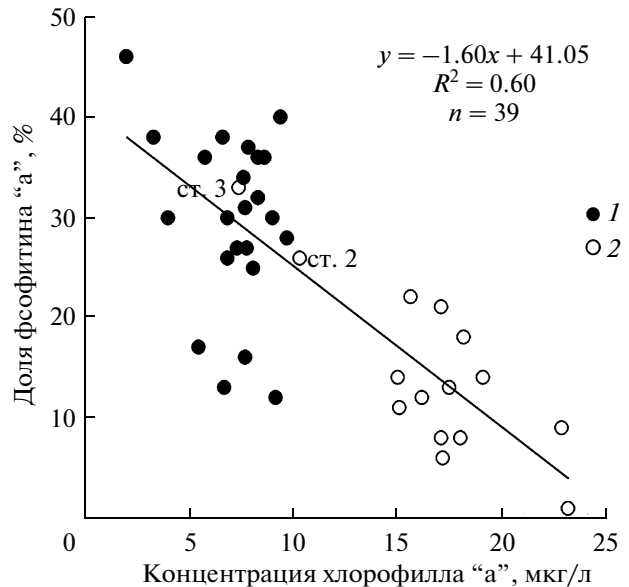


Рис. 3. Взаимосвязь между концентрацией хлорофилла “а” и долей феофитина “а” в дельте р. Волги. 1 и 2 – пробы, отобранные соответственно на Дамчикском и Обжоровском участках заповедника.

для фитопланктона в первую очередь разрушается хлорофилл “а”. Это явление сопровождается возрастанием содержания феопигмента – первичного продукта расщепления хлорофилла “а”. В более загрязненных акваториях можно ожидать повышенное содержание феофитина “а”.

Между концентрациями взвеси и хлорофилла “а” обнаружена положительная корреляция ($R = 0.69$ для 38 пар параллельных определений), что указывает на общее увеличение концентрации фотосинтетического пигмента по мере увеличения взвешенных частиц в воде. Эта связь лучше всего проявлена в водах западной части дельты, где концентрации хлорофилла “а” были ниже ($R = 0.78$ для 21 пары параллельных определений). Однако относительное содержание фитопигментов в сухом веществе взвеси выявляет более сложную картину зависимости распределения функционального хлорофилла “а” от мутности речных вод. Так, между концентрацией взвеси и долей хлорофилла “а” и феофитина “а” в сухой массе взвешенного вещества установлена надежная степенная зависимость (рис. 4 а, 4б).

Распределение хлорофилла “а” в пространстве пропорционально биомассе диатомовых водорослей (рис. 5). При сравнении с общей биомассой фитопланктона картина усложняется и эта связь несколько ослабевает, хотя пропорциональная зависимость в целом сохраняется. Все это указывает на высокую фотосинтетическую актив-

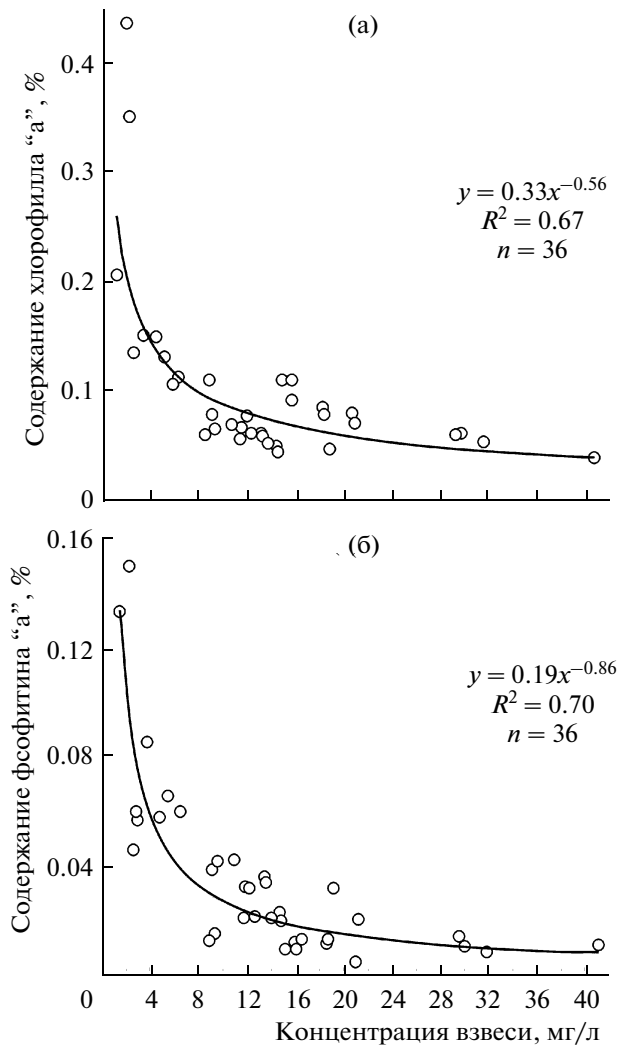


Рис. 4. Зависимость относительного содержания хлорофилла "а" (а) и феофитина "а" (б) в сухой массе взвешенного вещества от концентрации взвеси.

ность диатомовых водорослей в период половодья в середине мая.

Исследование состава фитопланктона

Количество клеток водорослей в фитопланктоне и его биомасса не постоянны в течение года и колеблются из года в год в зависимости от метеорологических условий, района моря, сезона и горизонта [18]. Основу фитопланктона в период спада половодья в устьевой области р. Волги составляли мелкие центрические диатомеи родов *Cyclotella*, *Stephanodiscus* и *Thalassiosira*. Это вполне естественно для весеннего фитопланктона Северного Каспия, в этот сезон преобладают диатомовые водоросли — от 58 до 94% общей численности клеток водорослей [25]. В мае 2008 г. в дельте Волги их численность (особенно *Cyclotella* и

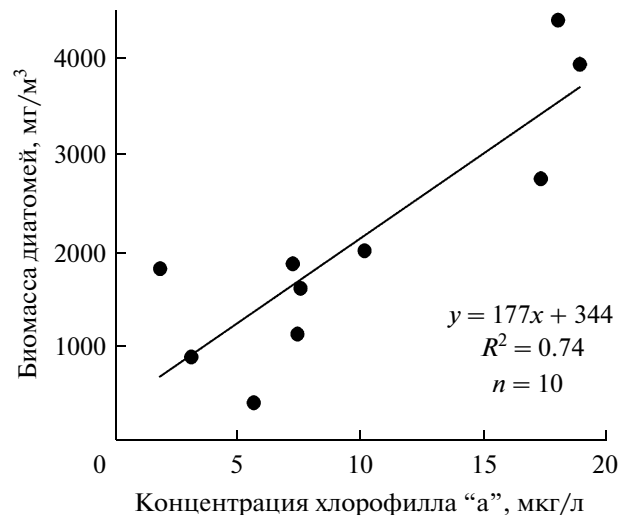


Рис. 5. Связь между распределением биомассы диатомовых водорослей и концентрацией хлорофилла "а".

Thalassiosira) часто достигала 4 млн кл/л, а биомасса — 4.4 г/м³ (табл. 2). Если диатомеи встречались в большом количестве во всех изученных пробах и были всегда доминирующей группой, то другие отделы водорослей (динофлагелляты, зеленые и цианобактерии) встречались относительно редко и в небольшом количестве. Зеленые водоросли обычно появляются в планктоне Северного Каспия поздней весной и держатся в течение всего лета, не достигая массового развития. Цианобактерии, характерные для Северного Каспия, все без исключения имеют только один максимум в период наиболее высоких температур (в конце лета), хотя некоторые из них начинают вегетировать весной [18].

В дельте распределение фитопланктона было весьма неравномерным. В глубине дельты на ст. 8 была достигнута наибольшая численность (4.4 млн кл/л) при биомассе 5.9 г/м³. В целом средняя суммарная численность фитопланктона была в два раза больше, а биомасса — почти в четыре раза больше в восточной части дельты по сравнению с западной.

Ст. 8 в глубине дельты несколько отличается по составу фитопланктона от остальных: только здесь численность динофлагеллят достигла 150 тыс. кл/л при биомассе 850 мг/м³. В этой пробе отсутствовали зеленые водоросли и пустые створки диатомей. Обжоровский участок дельты по составу фитопланктона четко делится на два района: внутридельтовый (ст. 8) и мористый (станции 2, 3, 6, 7). На предустьевом взморье, как правило, наблюдается быстрая смена видового состава (фитопланктона и зоопланктона) и происходит транс-

Таблица 2. Численность и биомасса фитопланктона в дельте р. Волги (прочерк – не обнаружено)

Станция	Сумма фитопланктона		Диатомеи		Динофлагелляты		Зеленые		Цианобактерии		Пустые створки кл/л
	кл/л	мг/м ³	кл/л	мг/м ³	кл/л	мг/м ³	кл/л	мг/м ³	кл/л	мг/м ³	
Обжоровский участок											
2	2714000	2239	2484000	1995	–	–	184000	147	46000	97	1058000
3	1394400	1874	1154400	1868	–	–	240000	6	–	–	176000
6	3424000	2750	3424000	2750	–	–	–	–	–	–	384000
7	2005000	4025	1900000	3960	–	–	100000	40	50000	25	250000
8	4400000	5948	4200000	4409	150000	850	–	–	50000	25	–
Среднее	2787480	5302	2632480	2996	150000	850	174667	64	48667	49	467000
Дамчикский участок											
9	2280000	1270	1680000	1123	80000	64	440000	11	80000	72	200000
12	1350000	2166	1300000	1816	50000	350	–	–	–	–	100000
15	742400	1084	691200	414	–	–	–	–	51200	256	200000
16	600000	889	564000	885	–	–	8000	–	16000	3	–
18	1700000	1606	1700000	1606	–	–	–	–	–	–	–
Среднее	1334480	1403	1187040	1169	65000	207	224000	11	49067	110	166667
Среднее для всех проб	2060980	3353	1909760	3050	93333	421	194400	51	48867	80	338286

формация речных планктонных комплексов в авандельтовые: из состава планктона исчезают многие типично речные формы, или их количество сильно уменьшается [2].

На ст. 9 на Дамчикском участке в глубине дельты численность динофлагеллят была гораздо ниже, чем на ст. 8 на Обжоровском участке, и составляла 80 тыс. кл/л. Однако здесь зафиксирована максимальная за весь период исследований численность зеленых водорослей (440 тыс. кл/л) и цианобактерий (80 тыс. кл/л). В отличие от восточной части дельты, на взморье и в протоках ее западной части местами встречались дианофлагелляты: на ст. 12 – до 50 тыс. кл/л.

По столь большому количеству фитопланктона дельту р. Волги можно отнести к эвтрофным (возможно, гипертрофным) районам. То положение, что основу фитопланктона составляют мелкие диатомовые водоросли, являющиеся кормом беспозвоночных и рыб, дает основание говорить о высокой продуктивности этого района, особенно – восточной части дельты р. Волги.

В мае происходит не только массовое развитие фитопланктона, но и его отмирание. В период исследования уже произошло значительное отмирание диатомовых водорослей. Повсеместно встречались пустые створки диатомей. Их максимальное число достигало 1 млн кл/л на приустьевом взморье Обжоровского участка (ст. 2). Здесь их чис-

ленность была лишь в два раза меньше, чем клеток с хлоропластами.

При наиболее высокой численности клеток фитопланктона (станции 2 и 6) наблюдалось уменьшение концентрации взвеси приблизительно в три раза по сравнению с ее значениями в протоках. Известно, что для развития водорослей необходим свет, от количества и качества которого зависит интенсивность фотосинтеза. Заметное уменьшение мутности воды и в результате – улучшение освещенности способствовало активному развитию фитопланктона. В остальных пробах число пустых створок – на порядок ниже и измеряется несколькими сотнями тысяч кл/л, а иногда они отсутствовали вообще, что указывает на разное сезонное состояние фитопланктона.

Количество пустых створок диатомовых водорослей, а также доля феофитина “а” на предустьевом пространстве были, как правило, выше, чем в протоках дельты. На взморье ниже устьев водотоков в условиях мелководья, сильного зарастания водной растительностью и резкого замедления течения происходит оседание и отмирание планктона.

Анализ материала показал, что в мае 2008 г. практически во всех исследованных пробах количество фитопланктона было обильным и достигало миллионов кл/л. Биомасса колебалась от 0.9 до 11.9 г/м³, т.е. создались благоприятные трофиче-

Таблица 3. Минеральный состав (результаты РФА) проб взвеси дельты р. Волги, % (прочерк – минерал не обнаружен)

Номер станции	Горизонт, м	Кварц	Альбит	Калиевые полевые шпаты	Кальцит	Доломит	Амфибол	Слюда	Каолинит + хлорит	Смектит
5	0	67	6	3	6	2	3	6	5	Следы
8	0	60	5	4	4	3	5	8	9	»
9	0	57	4	2	5	3	3	12	12	»
11	0	55	4	3	5	3	Следы	15	13	»
11	9	65	7	3	6	3	—	8	6	»

Таблица 4. Вертикальный поток и состав ОВ седиментационных ловушек в дельте р. Волги

Станция	Ловушка	Дата постановки	Глубина	Горизонт постановки	Скорость течения, м/с	Поток, г/м ² /сут	Al	Si	C _{орг}	Терригенное вещество	$\delta^{13}\text{C}-\text{C}_{\text{орг}}$, ‰
1	№ 1, Обжоровский участок	17–18 мая	4.5	3.5	0.5	47.0	3.32	32.2	0.2	38.7	–7.1
9	№ 2, Дамчикский участок	19–22 мая	4.0	3.0	0.3	12.6	5.16	32.1	0.5	60.1	–6.7

ские условия для зоопланктона и последующих звеньев пищевой цепи.

Минеральный состав взвеси

Северо-западная и западная части Каспийского водосбора сложены полого залегающими толщами карбона, перми, юры и мела (чехол Русской платформы). Каменноугольные отложения здесь представлены карбонатными толщами, пермские – карбонатными и карбонатно-галогенными образованиями, сравнительно маломощные юрские – также включают карбонатные образования, а в меловое время к ним добавляется мел [7]. Из этого следует, что реки, дренирующие равнины Русской платформы, должны поставлять в море карбонатный материал. Это подтверждается фактическими данными авторов о том, что во взвеси дельты р. Волги в мае 2008 г. содержание карбонатных минералов (кальцит и доломит) составило 7–9% (табл. 3). Взвешенное вещество всего Северного Каспия отличается высоким содержанием карбоната кальция различного генезиса [24].

Осадочный материал, собранный с помощью седиментационных ловушек, характеризовался очень тяжелым изотопным составом углерода: $\delta^{13}\text{C}-\text{C}_{\text{орг}}$ варьировал от –7.1‰ в восточной части дельты до –6.7‰ в западной (табл. 4). Это еще одно подтверждение высокого содержания во взвеси терригенного карбонатного материала.

В минеральной части взвеси в половодье, по данным авторов статьи, преобладали зерна кварца (в среднем 61%). Содержание полевых шпатов (альбит и калиевые полевые шпаты) было соизмеримо с содержанием карбонатных минералов и составило 6–10% (табл. 4). В отличие от данных Ю.П. Хрусталева [24], в половодье во взвеси кварц значительно преобладал над полевыми шпатами.

Содержание кварца в речной взвеси дельты р. Волги выше, чем во взвеси устьев ряда северных рек гумидной арктической и субарктической зоны [15]. Например, его содержание в три раза выше во взвешенном веществе дельты р. Северная Двина в период половодья [12]. Это указывает на интенсивное механическое выветривание в водосборном бассейне нижней Волги.

Глинистые минералы в период половодья были представлены преимущественно слюдой (в среднем 10%), каолинитом и хлоритом (9%), а также смектитом в следовых количествах (табл. 4). Сумма глинистых минералов варьировала от 11 до 28%. Наиболее высокое их содержание наблюдалось в западной части дельты. Эти значения примерно в 2.5 раза ниже среднего содержания глинистых минералов во взвеси устья р. Северная Двина в половодье [12]. Во взвесах многих северных рек (Мезени, Оби, Енисея и др.) содержание глинистых минералов (среди которых первосте-

Таблица 5. Содержание Si, Al, P во взвеси дельты р. Волги (прочерк – данных нет)

Станция		Горизонт, м	Si	Al	P	Терригенное вещество	Si/Al	P/Al	К.О.*	
основная	суточная		%						Si	P
Обжоровский участок										
1	—	0	30.60	5.96	0.17	69.46	5.13	0.03	1.68	3.57
2	—	0	27.94	5.09	0.22	59.32	5.49	0.04	1.79	5.40
3	—	0	24.09	4.16	0.37	48.48	5.79	0.09	1.89	11.12
4	—	0	19.91	5.67	0.42	66.08	3.51	0.07	1.15	9.26
5	—	0	31.38	5.13	0.13	59.79	6.12	0.03	2.00	3.17
6	—	0	25.08	5.18	0.15	60.37	4.84	0.03	1.58	3.62
7	—	0	29.07	4.91	0.11	57.23	5.92	0.02	1.93	2.80
8	—	0	28.38	6.08	0.15	70.86	4.67	0.02	1.53	3.08
8	1S-1	0	31.68	5.24	0.17	61.07	6.05	0.03	1.98	4.06
8	1S-1	2	25.75	6.45	0.19	75.17	3.99	0.03	1.30	3.68
8	1S-2	0	29.46	6.26	0.21	72.96	4.71	0.03	1.54	4.19
8	1S-3	0	28.38	6.26	0.17	72.96	4.53	0.03	1.48	3.39
8	1S-4	0	27.74	5.96	0.18	69.46	4.65	0.03	1.52	3.78
8	1S-5	0	24.92	6.35	0.18	74.01	3.92	0.03	1.28	3.54
8	1S-5	1.5	—	4.16	0.26	48.48	—	0.06	—	7.81
8	1S-6	0	26.30	6.50	0.23	75.76	4.05	0.04	1.32	4.42
8	1S-7	0	24.76	6.28	0.20	73.19	3.94	0.03	1.29	3.98
Среднее			27.22	5.63	0.21	65.57	4.83	0.04	1.52	4.76
Дамчикский участок										
9	2S-1	0	24.86	6.57	0.21	76.57	3.78	0.03	1.24	4.00
9	2S-2	0	27.28	6.86	0.20	79.95	3.98	0.03	1.30	3.64
9	2S-3	0	23.44	6.35	0.19	74.01	3.69	0.03	1.21	3.74
9	2S-4	0	25.50	6.64	0.19	77.39	3.84	0.03	1.26	3.58
9	2S-5	0	22.06	4.87	0.14	56.76	4.53	0.03	1.48	3.59
9	2S-6	0	28.22	5.72	0.15	66.67	4.93	0.03	1.61	3.28
9	2S-7	0	28.66	6.16	0.15	71.79	4.65	0.02	1.52	3.04
10	—	0	29.44	7.01	0.20	81.70	4.20	0.03	1.37	3.57
10	—	3.5	26.78	6.23	0.17	72.61	4.30	0.03	1.40	3.41
11	—	0	28.12	6.40	0.17	74.59	4.39	0.03	1.44	3.32
11	—	4	28.80	6.23	0.16	72.61	4.62	0.03	1.51	3.21
11	—	9	30.68	6.45	0.16	75.17	4.76	0.02	1.55	3.10
12	—	0	19.50	4.72	—	55.01	4.13	—	1.35	—
13	—	0	24.86	5.18	—	60.37	4.80	—	1.57	—
14	—	0	27.92	5.40	—	62.94	5.17	—	1.69	—
15	—	0	17.72	4.06	—	47.32	4.36	—	1.43	—
16	—	0	15.02	4.09	—	47.67	3.67	—	1.20	—
17	—	0	24.72	6.16	—	71.79	4.01	—	1.31	—
18	—	0	16.54	2.46	0.06	28.67	6.72	0.02	2.20	3.05
19	—	0	27.22	6.16	0.18	71.79	4.42	0.03	1.44	3.65
20	—	0	26.34	5.98	—	69.70	4.40	—	1.44	—
Среднее			24.94	5.70	0.17	66.43	4.45	0.03	1.45	3.44
Среднее для дельты			25.92	5.67	0.19	66.05	4.54	0.03	1.48	4.16

* К.О. – коэффициент обогащения, выражающий соотношение нормализованного по Al содержания элемента в речной взвеси и в континентальных осадочных породах: $(\text{элемент}/\text{Al})_{\text{взвеси}}/(\text{элемент}/\text{Al})_{\text{глины}}$.

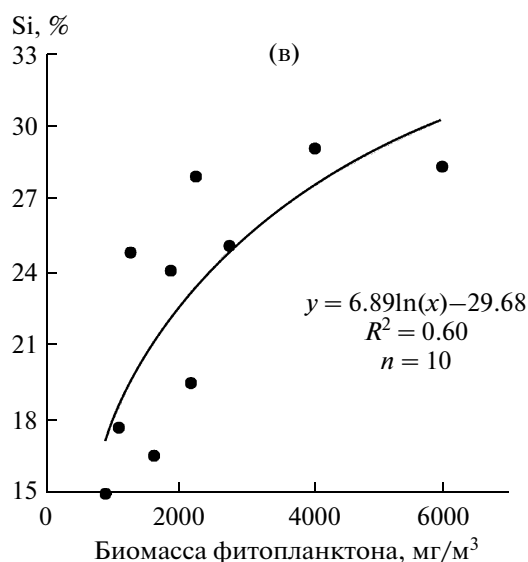
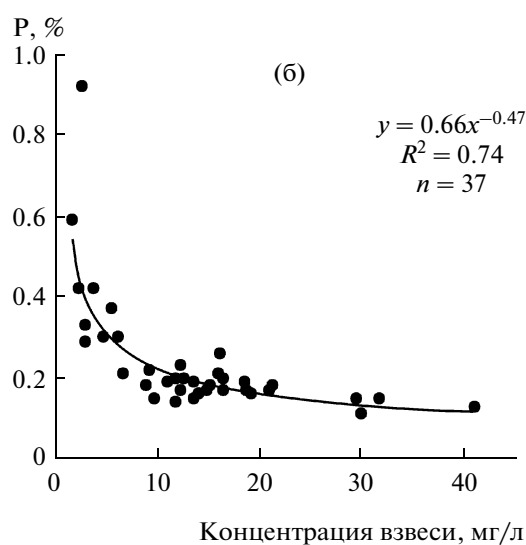
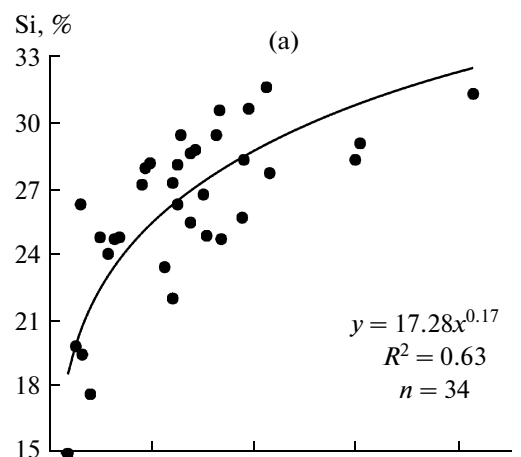


Рис. 6. Зависимость распределения взвешенной формы Si (а) и P (б) от концентрации взвеси и взвешенной формы Si (в) от биомассы фитопланктона.

пенную роль играет гидрослюда (иллит)) нередко превышает 50%. Налицо проявление особенностей аридной зоны седиментации.

Соотношение терригенной и биогенной частей взвеси

Содержание Si во взвеси дельты р. Волги во время половодья составляло около 25.4% (табл. 5), что очень близко к его среднему содержанию во взвесах рек мира (25.5% [5]), континентальных глинах и сланцах (26.23% [19]), литосфере (28.15% [30]) и несколько ниже его содержания в почвах (33%) и речных донных осадках (34%) [15]. Среднее содержание Al составляло 5.7%, что близко к его содержанию в речных донных осадках (4.9% [15]), ниже среднего содержания во взвесах рек мира (8.3% [5]), почвах (7.13% [15]), континентальных глинах и сланцах (8.58% [19]) и литосфере (8.23% [30]).

Между Si и Al выявлена слабая положительная парная корреляция ($R = 0.6$ для 38 проб) и отсутствие линейной зависимости, характерной для взвеси крупных северных рек: Оби, Печоры, Мезени, Северной Двины [10, 12, 15]. Это подтверждает относительно низкое содержание алюмосиликатов во взвеси р. Волги. Основная часть кристаллического Si во взвеси представлена тонкодисперсным кварцем. Кроме того, это указывает на более значительный вклад БВ (диатомовые микроводоросли и их детрит) в формирование взвешенного осадочного материала в дельте реки в мае. Установлена надежная степенная зависимость между содержанием взвеси и взвешенной формой Si (рис. 6а). К.О., рассчитанный для Si в дельте р. Волги (1.48), выше, чем, например, в дельте р. Северная Двина в период половодья (1.38).

Содержание минеральной части во взвеси, полученное расчетным путем по Al, варьировало от 47 до 82% (в среднем для дельты – 67%), за исключением ст. 18 (29%) (табл. 5). Взвешенное вещество дельты, как правило, наполовину, а часто и более, состояло из терригенного вещества, поступающего с водосбора. Примерно такое же соотношение терригенной и биогенной составляющих взвеси было установлено для устьев большинства северных рек.

Сток ОВ в Каспийское море с водами р. Волги составляет 3.18–4.33 млн т/год, что на порядок превышает их сток с водами Терека и Урала [16]. По сравнению с 1980-ми гг. в 1990-х гг. поступление ОВ с волжским стоком возросло в 1.3 раза. Фосфор, наряду с $C_{орг}$, элемент-индикатор ОВ. В реках он переносится преимущественно в виде

взвеси [6]. Между концентрацией взвеси и содержанием в ней Р авторами установлена надежная степенная зависимость (рис. 6б). Содержание Р в восточной части дельты было выше, чем в западной: 0.42 и 0.17% соответственно. Наиболее высокие значения обнаружены на станциях 3 и 4 в восточной части авандельты (табл. 5). Здесь следует ожидать высокое содержание ОВ.

Взвесь дельты р. Волги значительно обогащена по Р. Его К.О. примерно в два раза превышает аналогичный показатель для р. Северная Двина в период половодья. Такое обогащение взвеси по Р, очевидно, связано с возрастающей антропогенной нагрузкой [16], а также с высокой первичной продукцией в период массового развития фитопланктона. Биомасса фитопланктона имеет статистически значимую корреляцию с содержанием Si во взвеси (рис. 6в). Эта зависимость нелинейная и отражает сложную картину взаимосвязи между взвешенным веществом и его биогенной составляющей.

Оценка потоков осадочного вещества

В экспедиции была предпринята попытка исследования потоков ОВ с помощью седиментационных ловушек. Методика экспозиции ловушки и ее устройство даны в [14]. Ловушки были установлены на станциях 1 и 9 (табл. 4). Оказалось, что вертикальный поток в восточной части дельты почти в 4 раза выше, чем в западной. Его только условно можно назвать “вертикальным”, поскольку невозможно исключить того факта, что не было поступления вещества с горизонтальным речным потоком. Очевидно, что это — сумма вертикального и горизонтального взвесенесущих потоков. Тем не менее, такая попытка оценки потока вещества представляет большой интерес. В результате изучения состава ловушечного материала выявляются значительные различия между поставками ОВ с водосбора протоками восточной и западной частей дельты.

Содержание терригенного вещества в потоке на Дамчикском участке, полученное расчетным путем по Al, в 1.5 раза выше, чем в потоке на Обжоровском участке. Изотопный состав ловушечного материала, соответственно, заметно тяжелее в западной части дельты (Дамчикский участок).

Рассчитан горизонтальный поток взвеси для района постановки седиментационных ловушек (количество взвеси, которое течение может перемещать через данное сечение в единицу времени): 8.6 г/м²/с на Обжоровском и 3.5 г/м²/с на Дамчикском участках. Соответственно горизонталь-

ный поток хлорофилла “а”, по аналогичным расчетам, почти в 4 раза выше в восточной части дельты: 8.8 мг/м²/с на Обжоровском и 2.3 мг/м²/с на Дамчикском участках.

ВЫВОДЫ

Во время половодья в дельте р. Волги проведены комплексные исследования рассеянного осадочного вещества на начальной (гравитационной) ступени маргинального фильтра [13]. В пределах дельты выявлены значительные различия количественного содержания взвеси, ее минерального и вещественного состава (соотношение терригенной и биогенной частей по Si и Al) и потоков осадочного материала. Наиболее высокие значения всех изученных показателей (горизонтальный и вертикальный поток, концентрация взвеси, хлорофилла “а”, численность и биомасса фитопланктона) установлены для восточной части дельты (Обжоровский участок).

В мае взвешенное вещество дельты р. Волги можно отнести к органотерригенному типу, так как на фоне значительного содержания минеральных (преимущественно обломочных) частиц наблюдается огромное количество клеток диатомовых водорослей (что вызвано их массовым развитием в период половодья) и растительного детрита. Несмотря на многообразие процессов, происходящих в устьевой области, во все сезоны года (за редким исключением) терригенный материал является преобладающим компонентом [7]. В половодье восточная часть дельты, в отличие от западной, поставляла в море заметно большее количество хлорофилла “а”, а также БВ и ОВ.

Значительная часть осадочного материала оседает на краю дельты в области распространения островов, отмелей и зарослей водной растительности. Только примерно 20% взвешенного осадочного материала проходит этот гидродинамический барьер и подвергается дальнейшей биогеохимической трансформации на солевом барьере, где пресные речные воды смешиваются с солеными морскими. Эти процессы имеют фундаментальное значение не только для литолого-геохимических исследований, но также и для изучения загрязнений взвешенными веществами, т. е. важны для экологии.

Авторы благодарят А.П. Лисицына (ИО РАН) за научное руководство и поддержку работы; Н.С. Касимова (МГУ), А.К. Горбунова и А.В. Горбунову (Астраханский государственный заповедник) за помощь в организации и проведении экс-

педиции; А.Ю. Леин, Е.О. Золотых, А.Б. Исаеву за помощь в обработке материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гельман Е.М., Старобина И.З.* Фотометрические методы определения породообразующих элементов в рудах, горных породах и минералах. М.: ГЕОХИ, 1976. 69 с.
2. ГИС Астраханского заповедника. Геохимия ландшафтов дельты Волги. Геоэкология Прикаспия. Вып. 3 / Отв. ред. Лабутина И.А., Лычагин М.Ю. М.: МГУ, 1999. 227 с.
3. *Горбунов К.А.* Влияние зарегулирования Волги на биологические процессы в дельте. М., 1976. 219 с.
4. *Гордеев В.В.* Речной сток в океан и черты его геохимии. М.: Наука, 1983. 160 с.
5. *Гордеев В.В., Лисицын А.П.* Средний химический состав взвесей рек Мира и питание океанов речным осадочным материалом // Докл. АН СССР. 1978. Т. 238. № 1. С. 225–228.
6. *Емельянов Е.М., Романкевич Е.А.* Геохимия Атлантического океана. Органическое вещество и фосфор. М.: Наука, 1979. 219 с.
7. Каспийское море: проблемы седиментогенеза / Под ред. Холодова В.Н., Хрусталева Ю.П., Лубченко И.Ю. и др. М.: Наука, 1989. 182 с.
8. *Катунин Д.Н., Компаниец Ю.И., Иванова Н.В.* Изменение и распределение стока взвешенных наносов в дельте реки Волги // Гидрология южных морей (Каспийское море). Вып. 3, 4. Астрахань: КаспНИРХ, 2007. С. 88–93.
9. Комплексный анализ воздействия регулирования стока реки Волги на экосистемы поймы и дельты. ЮНЕСКО/РОСТЕ. Об экологических требованиях стока в низовьях реки Волга / Под ред. Леуменса Х. Астрахань, Волгоград, 2004. 36 с.
10. *Кравчишина М.Д., Лисицын А.П.* Гранулометрический состав взвешенных веществ в маргинальном фильтре реки Северной Двины // Океанология. 2011. Т. 51. № 1. С. 94–109.
11. *Кравчишина М.Д., Новигатский А.Н., Политова Н.В. и др.* Исследование водной взвеси дельты р. Волги в период весеннего половодья (май 2008 г.) // География морей и океанов. Матер. XVIII Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии. М.: ГЕОС, 2009. Т. III. С. 307–312.
12. *Кравчишина М.Д., Шевченко В.П., Филиппов А.С. и др.* Вещественный состав водной взвеси устья р. Северная Двина (Белое море) в период весеннего половодья // Океанология. 2010. Т. 50. № 3. С. 396–416.
13. *Лисицын А.П.* Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
14. *Лукашин В.Н., Ключиткин А.А., Лисицын А.П., Новигатский А.Н.* Малая седиментационная ловушка МСЛ–110 // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 746–750.
15. *Морозов Н.П., Батулин Г.Н., Гордеев В.В., Гурвич Е.Г.* О составе взвесей и осадков в устьевых районах Северной Двины, Мезени, Печоры и Оби // Гидрохим. матер. Л.: Гидрометеоздат, 1974. Т. LX. С. 545–557.
16. *Никаноров А.М., Смирнов М.П., Клименко О.А.* Многолетние тенденции общего и антропогенного выноса органических и биогенных веществ реками России в Балтийское, Черное, Азовское, Каспийское моря и в озеро Байкал // Вод. ресурсы. 2010. Т. 37. № 2. С. 209–217.
17. *Полонский В.Ф., Луначев Ю.В., Скриптунов Н.А.* Гидролого-морфологические процессы в устьях рек и методы их расчета (прогноза). СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 383 с.
18. *Прошкина-Лавренко А.И., Макарова И.В.* Водоросли планктона Каспийского моря. Л.: Наука, 1968. 290 с.
19. *Ронов А.Б., Ярошевский А.А.* Химическое строение земной коры // Геохимия. 1967. № 11. С. 1285–1309.
20. *Синенко Л.Г.* Оценка влияния климатических и антропогенных факторов на изменение термического режима водотоков дельты Волги // Гидрология южных морей (Каспийское море). Вып. 3, 4. Астрахань: КаспНИРХ, 2007. С. 75–81.
21. *Синенко Л.Г.* Оценка составляющих стока взвешенных наносов устьевой области Волги // Гидрология южных морей (Каспийское море). Вып. 3, 4. Астрахань: КаспНИРХ, 2007. С. 199–207.
22. *Усачев П.И.* Количественное колебание фитопланктона в Северном Каспии // Тр. ИО АН СССР. 1948. Т. II. С. 70–88.
23. Устьевая область Волги: гидролого-геоморфологические процессы, режим загрязняющих веществ и влияние колебаний уровня Каспийского моря. М., 1998. 280 с.
24. *Хрусталева Ю.П.* Закономерности современного осадконакопления в Северном Каспии. Ростов-на-Дону: Ростовский ун-т, 1978. 206 с.
25. *Яблонская Е.А.* Биология Каспийского моря. М.: ВНИРО, 2007. 141 с.
26. EPA Method 445.0. In vitro determination of chlorophyll “a” and pheophytin “a” in marine and freshwater algae by fluorescence // National Exposure Res. Lab., Office of Res. and Develop., U.S. Environmental Protection Agency / Eds. Arar E.J., Collins G.B. Cincinnati, Ohio, 1997. Rev. 1.2. 22 p.
27. *Holm-Hansen O., Riemann B.* Chlorophyll “a” determination: improvements in methodology // Oikos. 1978. V. 30. P. 438–447.
28. *Overeem I., Kroonenberg S.B., Veldkamp A. et al.* Small-scale stratigraphy in a large ramp delta: recent and Holocene sedimentation in the Volga delta, Caspian Sea // Sedimentary Geology. 2003. № 159. P. 133–157.
29. *Rodionov S.G.* Global and regional climate interaction: the Caspian Sea Experience. Dordrecht: Kluwer Academic Publishing, 1994. 241 p.
30. *Taylor S.R.* Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1964. V. 28. P. 1273–1285.
31. UNESCO. Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) core measurements, IOC/SCOR manual and guides // UNESCO Publ. Paris, 1994. № 29. P. 128–134.