

3.2. Сток малых и средних рек российского побережья Черного моря и его влияние на характеристики вод

П.Н. Маккавеев, П.О. Завьялов

Введение

Речной сток – это источник биогенных веществ, а также загрязнения – промышленного, бытового и сельскохозяйственного. Этим определяется значимость его влияния на функционирование морских экосистем. Крайне важна и роль материкового стока в формировании гидрофизического режима морей на континентальных шельфах. Будучи внутренней, почти замкнутой морской акваторией, Черное море особенно подвержено влиянию материкового стока. Общее число впадающих в него больших и малых рек приближается к 1000, однако только 10 относятся к категории крупных, с площадью водосборного бассейна свыше 10 000 км². Средний объем годового стока в Черное море оценивается примерно в 350 км³, причем около 80% этого объема приходится на упомянутые выше 10 крупных рек. В первую очередь это Дунай (200 км³). Следующими по величине стока реками являются Днепр (44 км³), Риони (13 км³) и Днестр (9 км³) [Джаошвили, 2003]. Стокам этих рек, особенно Дуная, посвящена обширная литература. Но на многих малых и средних реках Черного моря систематические наблюдения за расходами не ведутся, хотя суммарный вклад их в водный баланс моря значителен. С этим связана значительная неопределенность в расчетах суммарного пресноводного стока, по данным разных авторов оценки меняются от 294 км³ до 474 км³ [Альтман, Кумыш, 1986; Гидрометеорология..., 1991; Маккавеев, 1981; Солянкин, 1963; Сорокин, 1982; Zaytsev, Mamaev; 1997]. При этом на долю малых и средних рек приходится, по разным оценкам, от 40 до 120 км³ годового объема стока.

В пределах России в море впадают малые реки числом более 20, а также несколько средних: Пшада, Вулан, Туапсе, Псезуапсе, Сочи, среднегодовой расход которых – порядка 10–15 м³/с и годовой объем стока – 0,3–0,5 км³, и более крупные – Шахе (37 м³/с, и 1,2 км³) и Мзымта (49 м³/с, и 1,6 км³). Общий среднемноголетний объем стока в Черное море с территории России – около 7 км³ в год. Это лишь 2% от суммарного пресноводного стока в море. Большинство рек северо-восточной части моря сбрасывают более 80% своего стока в зимне-весенний период, что связано с преобладанием в их питании дождевой составляющей.

Существует мнение, что на формирование базы питательных элементов в Черном море подавляющее воздействие оказывает вертикальный обмен вод [Лукашев, Шендеров, 1998], а влияние материкового стока даже в прибрежной зоне моря в балансе биогенных веществ незначительно. В этой работе было показано, что запас биогенных элементов в эвфотическом слое прямо зависит от глубины

проникновения зимней конвекции и, следовательно, зимней температуры водной поверхности. Там же приводится мнение, что вклад рек российского побережья в баланс биогенных элементов прибрежной части Черного моря составляет всего 2–6%, что, по мнению авторов, находится практически на границе точности балансовых расчетов. Но не следует недооценивать роли малых и средних рек в переносе вещества в системе река–море. Этот сток, являясь не столь значительным компонентом водного баланса для моря в целом, может оказывать заметное влияние на гидрофизику, гидрохимию и гидробиологию в локальных масштабах российского черноморского шельфа [Завьялов, Маккавеев, 2014]. Особенно остро для российского сектора Черного моря стоит вопрос о переносе загрязнения с материковым стоком в акваториях крупных городов: Анапа, Новороссийск, Геленджик, Туапсе, Сочи. Так, в прибрежные воды крупнейшего курорта страны города Сочи ежегодно сбрасывается около 90 млн. т загрязненных сточных вод и только 15% из них могут считаться чистыми или нормативно-очищенными [Амирханов и др., 1997].

Роль материкового стока в формировании гидрофизического режима приустьевых участков моря не сводится только к непосредственной, «алгебраической» реакции термохалинных полей на привнесение речных вод. Более существенно то, что трансформация этих вод приводит к перестройке вертикальной плотностной стратификации и как следствие – процессов турбулентного обмена в целом. В результате локальное опреснение верхнего слоя речным стоком часто влечет за собой значительные изменения балансов тепла, импульса и завихренности на большем пространственном масштабе [Zavialov et al., 2003].

В прибрежных районах, прилегающих к устьям рек, формируется специфическая зона контакта морских и речных вод. До недавнего времени основное внимание исследователей было сосредоточено на процессах, проходящих в местах впадения в море крупных рек. Как уже говорилось выше, малые и средние водотоки могут играть значительную роль в формировании гидрохимического режима и переносе вещества в прибрежной зоне. До последнего времени изучение неоднородностей химического состава вод микро- или малого масштаба в значительной степени сдерживалось недостаточной дискретностью наблюдений как по времени, так и в пространстве. Относительно небольшие масштабы изучаемых объектов требовали разработки новых методов их изучения. Настоящая работа посвящена исследованию влияния именно малых и средних рек на прибрежные акватории северо-восточной части Черного моря. Для оценки влияния стока средних и малых рек на состояние российских прибрежных экосистем Черноморского побережья Кавказа Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН с 2006 г. проводятся ежегодные прибрежно-морские экспедиционные работы в российском секторе моря. Программа работ в этих экспедициях, продолжающихся до сих пор, весьма обширна и включает гидрофизические, гидрохимические и гидробиологические исследования [Завьялов и др., 2014; Маккавеев, Завьялов, 2014].

Организация работ

Относительно небольшие характерные размеры исследуемых объектов требовали и другого подхода к организации наблюдений. Наблюдения выполнялись с маломерных судов (за исключением 2007 г, когда работы велись на НИС «Акванавт»), для обработки проб организовывалась береговая лаборатория. В каждом из районов выполнялись 3–5 поперечных берегу разрезов от изобаты 5 м до 50 м. Расстояние между соседними разрезами было 1–3 км. На разрезах выполнялись несколько гидрологических станций для измерений гидрофизических характеристик и отбора проб воды по водному профилю. Работа на станциях включала STD-зондирования термохалинной структуры и измерения скорости течений акустическим доплеровским зондом (ADP). При движении судна на переходах проводилась непрерывная регистрация параметров поверхностного слоя моря. Для этого использовались специально разработанная в ИО РАН проточная зондирующая система и ультрафиолетовый флуоресцентный лидар. В проточной системе датчики измеряли температуру, соленость, содержание кислорода и других химических компонентов в поверхностной воде по ходу судна, а лидар фиксировал спектры флуоресценции растворенных и взвешенных в воде веществ и производил определение концентрации хлорофилла, взвеси и растворенной органики. Проточная система и лидар вместе обеспечивали очень высокое пространственное разрешение, порядка первых метров.

Для исследования переноса загрязнений и терригенных веществ на всех полигонах также устанавливались заякоренные станции, оснащенные измерителями скорости течения. Такие же станции ставились и непосредственно в устьях рек, чтобы проследить за изменениями расхода речной воды. На берегу устанавливалась портативная метеостанция и в течение всего периода работ регистрировались 10-минутные осреднения скорости и направления ветра, а также других метеопараметров.

Отбор проб для химического анализа проводился не только на гидрологических станциях. В местах, где отмечались значительные изменения гидрологических параметров, содержания кислорода и величины рН, а также при смене галсов с поверхности отбирались пробы для гидрохимического анализа во временной береговой лаборатории. В ней проводился комплекс стандартных гидрохимических наблюдений и подготовка проб для передачи в стационарные лаборатории. Кроме сбора проб в приустьевых областях рек проводился отбор воды в различных водотоках района исследований. Большинство работ проводилось весной в период полной воды, хотя несколько раз работы проводились и в зимний и осенний периоды.

Устьевые области

Устьевая область реки в современной литературе [Михайлов, 1997] определяется как «географический объект, охватывающий район впадения водотока в

приемный водоем (океан, море, озеро, другой водоток и др.), строение и свойства которого формируются под действием специфических устьевых процессов – динамического взаимодействия вод, отложения и переноса взвешенного вещества (наносов)». К этому перечню процессов следует добавить и особые биогеохимические процессы, специфичные для устьевых областей, прежде всего это контакт (слияние) вод различного генезиса и, следовательно, различных свойств. Зона смешения характеризуется наибольшими горизонтальными и вертикальными градиентами солености (минерализации) вод и содержания растворенных веществ. Протяженность зоны смешения меняется в зависимости от расхода реки (сезона), солености вод моря, гидродинамики и морфометрических характеристик прибрежных акваторий. Пространственное положение внутренней и внешней границ зоны смешения речных и морских вод в устьях рек зависит от сезонной изменчивости объема стока пресных вод, сгонно-нагонных и приливо-отливных явлений.

Состав химического стока рек индивидуален для каждой реки, определяется гидрометеорологической ситуацией и характером бассейна ее водосбора (состав пород, грунтовые воды, водный баланс). Кроме того, состав вод подвержен и значительным изменениям во времени в зависимости от фазы гидрологического режима. Например, для рек высоких и умеренных широт значительны сезонные изменения в питании реки [Воронков, 1970]. В зимний период атмосферные, склоново-грунтовые и почвенно-грунтовые источники питания реки практически полностью подавляются, основную роль играют подземные источники. Значительно падает расход воды, содержание биогенных элементов возрастает, особенно кремния и нитратной и аммонийной форм азота.

Для гидрохимиков и геохимиков особый интерес представляют так называемые «эстуарные фронты» [Корчагин, Монин, 2004]. Более привычно для гидрохимика обозначать эти зоны Мирового океана терминами «зоны смешения», или «геохимический барьер река–море» [Гордеев, 1983; Лисицин, 1988]. Согласно современным представлениям, в этих зонах не просто проходит механический перенос вещества из суши в океан. В этих весьма ограниченных по площади зонах происходит трансформация переносимого реками вещества и основное накопление донных осадков. Эстуарии и дельты рассматриваются как первый глобальный уровень лавинной седиментации [Гордеев, 2012; Лисицин, 1988; Тищенко и др., 2005].

Распределение гидрохимических показателей в устьевой области имеет свои особенности. В каждом конкретном случае картина распределения различных химических составляющих воды будет зависеть в первую очередь от индивидуального состава вод втекающего водотока и приемного водоема. С гидрохимической точки зрения, устьевую область можно упрощенно представить как линию смешения вод, на одном конце которой – типичные воды впадающего водотока, на другом – воды, обладающие свойствами приемного водоема. Но характеристики этих «конечных точек» очень непостоянны, могут меняться и от водотока к водотоку, и во времени для каждого отдельного водотока

Характер распределения растворенных веществ в устьевом и приустьевом участке рек не будет определяться простым законом смешения вод. Даже достаточно инертные в биохимическом смысле компоненты состава вод в устьевых участках рек могут изменяться, не подчиняясь уравнению смешения консервативных параметров. Наибольшие градиенты в пространственном распределении гидрохимических параметров наблюдаются, как правило, вблизи положения гидрологического «эстуарного фронта». Выделяется несколько основных простых типов распределения гидрохимических и гидрологических параметров вдоль основного потока речных вод в зоне смешения вод. Это – вертикальный фронт, когда изолинии содержания гидрохимических параметров расположены практически вертикально, горизонтальный фронт – когда изолинии минерализации и содержания гидрохимических параметров от втекающего водотока в приемном бассейне расположены в виде клина, полого поднимающегося по направлению к приемному водоему. Деление фронтальной зоны на вертикальную и горизонтальную можно привязать и к делению приустьевых районов на приглубые и отмелье. Приглубый приустьевой район, где речной поток, втекая в приемный водоем, отрывается от дна, более способствует формированию горизонтального фронта, а отмель, где втекающий поток занимает всю толщу воды – вертикального фронта. Горизонтальный фронт (скорее наклонный) формируется, когда воды впадающего водотока и приемного бассейна расположены одна над другой. Под горизонтальным фронтом, способствующим возникновению плотностной границы вод, на распределении гидрохимических параметров может сказываться затрудненный водообмен. В первую очередь это отразится на содержании растворенного кислорода, и особенно на его насыщении, реже – на содержании биогенных элементов, главным образом на увеличении содержания различных форм азота.

В зависимости от гидрометеорологических условий (в первую очередь скорости и направления ветра) вид эстуарного фронта может меняться. Так, под действием ветра, направленного против течения впадающего водотока (нагонный ветер), горизонтальный фронт может быстро, менее чем за сутки, превратиться в вертикальный. И наоборот, сгонный ветер (направленный в сторону приемного водотока) может сдвигать верхний слой вод, формируя горизонтальный фронт, иногда значительной протяженности. Но такие простые типы фронтальной зоны свойственны большей частью для небольших водотоков. Для устьевых областей крупных рек характерны «сложные» фронтальные зоны, в которых на уровне первого геохимического барьера зона контакта вод представлена вертикальным фронтом. Ниже по течению изолинии выполаживаются, становясь практически горизонтальными, и далеко прослеживаются по акватории приемного водоема.

Но зона контакта морских и речных вод не ограничивается эстуарным фронтом. Попадая из реки в море, материковые воды образуют там мезомасштабные структуры, выделяющиеся пониженной соленостью, и с температурой, отличной от окружающей воды, повышенной мутностью, высоким содержанием взвешен-

ной и растворенной органики. Такие структуры в современной литературе принято называть «плюмами» (от английского *plume*). Пространственные масштабы плюмов для крупных рек могут достигать сотен километров, при этом они, как правило, сохраняют резко очерченную границу (порядка сантиметров) с окружающими морскими водами. Плюмы всегда приурочены к поверхности, поскольку формирующие их воды характеризуются пониженной плотностью воды, но по вертикали они могут охватывать более или менее значительный слой, толщина которого зависит от мощности стока и интенсивности перемешивания. Из наблюдений (особенно спутниковых) известно, что для речных плюмов характерно большое разнообразие морфологических форм и типов динамического поведения. Они обладают собственным инерционным движением, взаимодействуют с батиметрией и после этого, смешиваясь с окружающими водами, доставляют в море вещество и энергию материкового стока. Можно сказать, что именно в динамике плюмов лежит ключ к пониманию механизмов распространения материкового стока в океане и его взаимодействия с морскими водами. Но закономерности поведения плюмов больших и малых рек в различных условиях изучены недостаточно [Завьялов и др., 2014].

Результаты региональных исследований

Приустьевая область р. Пшады

Среднемноголетнее значение стока реки Пшады составляет $0,31 \text{ км}^3$ в год, или $9,8 \text{ м}^3/\text{с}$ [Джаошвили, 2003]. Во время работ (2.06. 2006 г.) объем стока был существенно меньшим среднемноголетнего и составлял не более $3 \text{ м}^3/\text{с}$. При умеренном северном ветре, западнее устья р. Пшады находилась область антициклонической завихренности с преобладанием сильного (до $50 \text{ см}/\text{с}$) течения в юго-восточном направлении. Восточнее устья, наоборот, располагалась циклоническая структура с более слабыми течениями, направленными от берега на юго-запад. Напротив устья обе структуры образовывали зону конвергенции, вдоль линии которой наблюдалось слабое струйное течение в направлении от берега. Характерные пространственные масштабы опресненной приустьевой области (плюма) р. Пшады составляли около 1 км. Можно предположить, что в моменты пиковых значений стока эти масштабы оказываются в несколько раз большими.

Влияние речных вод хорошо прослеживается по пониженным величинам рН и содержания растворенного кислорода и повышенному содержанию растворенного кремния (рис. 3.2.1). Возможно, что понижение содержания растворенного кислорода связано не только с воздействием речного стока, но и с потреблением его в процессе окисления органического вещества и дыхания сейстонных организмов. Восточнее устья реки, у берега, величины рН и содержание кислорода возраста-

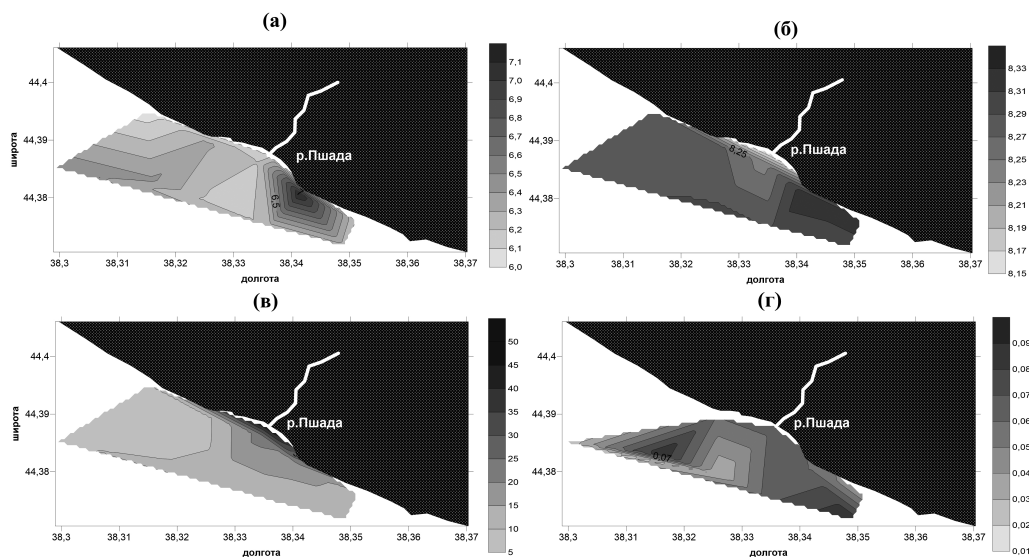


Рис. 3.2.1. Распределение в поверхностных водах приустьевое участка р. Пшады (02.06.2006): а – содержания растворенного кислорода (мл/л); б – величины pH (ед. шкалы NBS); в – содержания растворенного кремния (μM); г – содержания растворенного минерального фосфора (μM).

ли, что могло быть связано с усилением продукционных процессов в результате поступления питательных веществ с материковым стоком. Содержание общего и минерального фосфора в поверхностных водах, находящихся под влиянием речного стока, было несколько понижено по сравнению с фоновыми значениями. Это связано с невысоким содержанием фосфора в воде р. Пшады (табл. 3.2.1) и относительно низкой интенсивностью процессов окисления органического вещества (или невысоким его содержанием) в непосредственной близости от устья реки. По гидрохимическим параметрам влияние реки отчетливо прослеживается на расстоянии 1,0–1,5 км в сторону открытого моря и до 2 км вдоль берега в восточном от устья направлении. Более всего воздействие стока Пшады сказывается на величинах pH, общей щелочности и содержания растворенного кремния.

Приустьевая область р. Вулан

Среднегодовое значение стока р. Вулан составляет $0,20 \text{ км}^3$ в год, или $6,4 \text{ м}^3/\text{с}$ [Джаошвили, 2003]. Во время работ (4.06.2006) объем стока был выше среднегодового и составлял до $10 \text{ м}^3/\text{с}$. Кроме р. Вулан, устье которой находится в западной части одноименной бухты, в этом районе имеется еще речка

Таблица 3.2.1
Гидрохимические показатели исследованных рек

Место и дата отбора	O ₂ мг/л	pH NBS	Alk мг·экв/л	PO ₄ мкг-ат/л	P _{tot} мкг-ат/л	Si мкг-ат/л	NO ₃ мкг-ат/л	NO ₂ мкг-ат/л	NH ₄ мкг-ат/л	N _{tot} мкг-ат/л	Urea мкг-ат/л
р. Пшадя 2.06.2006		7,91	3,9	0,02	0,13	136,48	5,27	0,14	0,69	62	0,09
р. Мезыбь 4.06.2006		7,756	4,303	0,02		127,38	14,97	0,23	0,38	41	0,84
р. Вулан 7.06.2006	6,66	8,31	4,276	0,15	0,26	96,97	1,83	0,17	0,72	49	0,39
р. Вулан 4.05.2007	8,52	8,09	4,175	0,25	0,29	108,6	22,49	0,03	1,52	41	1,85
р. Вулан 4.05.2007	8,09				0,34	100,8	20,76	0,02	2,09	33	1,61
р. Вулан 10.10.2008		8,04– 8,09	3,761	0,02– 0,11			4,61	0,32	0,09		
р. Вулан 02.12.2012	7,45	8,27	4,732	4,84	5,18	104,5	3,75	0,14		272	
р. Тешебс 7.06.2006		7,93	4,182				10,54	0,19	0,53	101	0,20
р. Тешебс 4.05.2007	8,23				0,44		7,03	0,29	1,01	18	1,88
р. Тешебс 10.10.2008							64,51	0,70	0,24		
р. Кулепста 24-26.05.2009		8,16– 8,40	3,010– 3,420	0,00– 0,02		80,7–93,1	36,86– 42,23	0,45–0,73			
р. Кулепста 16.05.2010		8,65									
р. Кулепста 27.05.2011		7,94– 8,04	2,505– 2,593	0,59– 0,78		88,9–91,3	35,84– 37,14	0,74–0,78			
р. Кулепста 30.11.2012		7,52– 8,13	3,029– 3,649	5,25– 9,63	5,55– 10,02	37,6–110,6	12,94– 32,04	1,75–4,94		300– 3172	
р. Кулепста 21.05.2013		7,75– 8,18	3,242– 3,416	0,01– 1,50		103,0–112,2	12,56– 26,76	0,45–3,34			
р. Кулепста 25.05.2014		8,26– 8,41	3,216– 3,304	0,64– 1,98		68,7–118,0	38,27– 44,24	1,32–2,09			
р. Мзымта 26.05.2009		8,31– 8,50	0,921– 0,970	0,10– 0,21		81,1–86,1	16,71– 22,86	0,41–0,62			

Таблица 3.2.1 (продолжение)

Место и дата отбора	O ₂ мг/л	pH NBS	Alk мг-экв/л	PO ₄ мкг-ат/л	P _{tot} мкг-ат/л	Si мкг-ат/л	NO ₃ мкг-ат/л	NO ₂ мкг-ат/л	NH ₄ мкг-ат/л	N _{tot} мкг-ат/л	Urea мкг-ат/л
р. Мзымта 18.05.2010		8,51– 8,70	1,185– 1,216	0,37– 0,43		90,2–91,3	12,3– 12,5		0,20– 0,22		
р. Мзымта 27.05.2011		7,97	1,568			76,86	14,40	0,62			
р. Мзымта 30.11.2012		8,01– 8,15	1,510– 1,536	2,55– 3,93	2,79– 4,30	96,9–107,7	16,97– 18,46	0,85–2,39		207–237	
р. Мзымта 20-24.05.2013		7,97– 8,84	0,582– 1,322	0,15– 2,43		87,3–114,2	15,21– 149,0	0,18–2,08			
р. Мзымта 25.05.2014		8,43– 8,63	1,005– 1,021	0,78– 3,14		32,5–97,2	18,89– 30,46	0,25–2,30	2,98		
р. Былха 16.05.2010		8,52	7,448			30,4	1,56				
р. Былха 02.12.2012	5,91	8,51	6,837	6,15	8,02	138,3	27,76	3,08		2791	
р. Былха, устье 28.05.2014		8,20	5,25– 5,46	1,38– 1,44		168,9–172,3	36,74– 42,86	3,67–4,21	651,6– 761,7	0,79	
р. Былха, исток 28.05.2014		8,11	3,57	0,01		41,11	2,14	0,06			
р. Ашамба 03.12.2012	7,58	8,24	4,884	5,74	6,23	132,2	60,2	0,21		380	
р. Херога 26.05.2011		7,68– 8,61	2,53– 4,35	3,59– 4,36		162,3–199,6	34,6– 71,5	3,59–8,85			
р. Хашупсе 27.05.2011		8,60	1,949	0,65		120,20	13,66	0,41			
р. Бзыбь 27.05.2011		8,52	1,443	4,27		74,85	11,92	2,97			
Канал, Имеретинская низменность 27.05.2011		7,03	4,628			78,54	15,35	4,13			
Канал, Имеретинская низменность 24.05.2013		7,16	4,395	1,16		226,23	13,73	9,82			
Устье р. Мацеста 27.05.2011		7,62	2,812	0,34		107,70	44,99	2,24			

Таблица 3.2.1 (окончание)

Место и дата отбора	O ₂ мл/л	pH NBS	Alk мг-экв/л	PO ₄ мкг-ат/л	P _{tot} мкг-ат/л	Si мкг-ат/л	NO ₃ мкг-ат/л	NO ₂ мкг-ат/л	NH ₄ мкг-ат/л	N _{tot} мкг-ат/л	Urea мкг-ат/л
Устье р. Лоо 27.05.2011		7,59– 8,18	2,944– 3,002	0,57– 1,75		99,4–131,2	22,33– 57,65	0,39–3,85			
р. Сочи 16.05.2010				0,18		55,6		0,14			
р. Сочи 27.05.2015		8,15– 8,19	1,978– 2,123	0,97– 1,20		92,4–94,9	40,08– 41,69	0,93–1,18	3,99– 6,50		
р. Осохой 27.05.2011		7,98	3,284	0,23		152,43	8,96	0,27			
р. Хоста, 24.05.2013		8,43	2,400	0,03		67,77	15,12	0,31			
р. Бешенка, 24.05.2013		8,00	1,086	0,32		143,03	55,89	0,33			
р. Бешенка, 29.05.2014		8,32	1,126	0,67		139,3	19,91	0,35			
Мельничный руч. 24.05.2013		8,00	0,858	0,89		172,4	48,17	0,91			
р. Чвиджипсе, 29.05.2014		8,55	0,788	0,47		100,7	12,91	0,30	1,25		
Казачий брод 29.05.2014		8,78	0,933	1,59		96,0	12,79	0,94	3,07		
г. р. Келша 29.05.2014		8,19	2,991	1,08		109,0	22,36	0,50			

Тешебс, которая впадает в море у восточной оконечности бухты, на расстоянии около 1 км от устья р. Вулан. Во время измерений объем стока р. Тешебс был менее 1 м³/с. Поле скорости течения, по данным ADP-зондирования на полигоне «Вулан», в основных чертах напоминало описанное выше для приустьевой области р. Пшады. Измерения выполнялись также в условиях отгонного северного и северо-восточного ветра, но ветер был сильнее (более 10 м/с). В западной части полигона наблюдалась область антициклонической завихренности, а в восточной – циклоническая структура. В области конвергенции этих двух вихрей, находящейся напротив речных устьев, было снова отмечено струйное течение в южном направлении при скоростях около 40 см/с.

Во время работ в октябре 2008 г. наблюдался переход от ситуации нагонных штормовых ветров и практического отсутствия речного стока к ситуации умеренного отгонного ветра, сопровождавшегося проявлениями апвеллинга в прибрежной зоне и некоторой интенсификацией речного стока. При нагонном ветре (10.10.2008) весь район исследований занят хорошо развитым интенсивным (более 30 см/с) вдольбереговым течением, направленным к северо-западу. Это течение захватывало весь столб воды от поверхности до дна. При смене ветра на сгонный (12.10.2008) быстрое течение к западу занимало только внешнюю границу района исследований, большая же часть работ была занята полем относительно слабых течений, в котором преобладали отжимные компоненты (особенно напротив устья реки) и выделялись мезомасштабные антициклонические структуры. В условиях слабого стока, характерного для периода осенней межени, основные характеристики плюма (горизонтальные и вертикальные масштабы областей опреснения, величина понижения солености, концентрация связанных со стоком растворенных и взвешенных веществ) были в 3–5 раз ниже, чем для периода весеннего половодья. Ветры южных румбов в период межени способны эффективно «запирать» сток и даже приводить к обратному затоку морских вод в речные устья. Характерное время приспособления плюмажа к изменению ветровых условий составляет от нескольких часов до суток. Воздействие речного стока на гидрохимическую структуру вод, несмотря на низкий расход воды в период осенней межени, также прослеживается отчетливо.

Осенью 2008 г. область опреснения стоком р. Вулан была смещена к западу по отношению к оси бухты и, по-видимому, связана только со стоком р. Вулана, в то время как р. Тешебс, впадавшая восточнее, не оказывала существенного влияния на распределение термохалинных полей. Характерные размеры плюмажа р. Вулана – более 2 км². Придонные течения на ближних к берегу станциях были преимущественно направлены на восток и не было обнаружено ярко выраженной связи направления течений с изменением характеристик ветров. Средняя скорость придонных течений составила 7 см/с, максимальная – 21 см/с. В отличие от случая р. Пшады, след стока р. Вулан хорошо прослеживается и в температуре поверхности моря, которая в плюме оказывается ниже на 0,5–1,0°C. Несомненно,

это охлаждение – результат не столько привнесения более холодных речных вод, сколько повышенной теплоотдачи из стратифицированной области при сильном ветре. Схема течений показывает, что основной вынос вещества мог проходить в зоне струйного течения, направленного на юг, основная ось которого находится несколько восточнее устья р. Тешебс. Вероятнее всего, по направлению этого течения будет прослеживаться интегральное воздействие речного стока в бухту. Однако для общей щелочности, величины рН, нитритного азота, общего азота прослеживаются два «языка», отходящие от устьев обеих рек (рис. 3.2.2).

Основные черты воздействия речного стока на гидрохимическую структуру вод – понижение величины рН, увеличение общей щелочности и содержания растворенного неорганического кремния – прослеживались отчетливо. Особенности гидрохимического режима бухты Вулан связаны с впадением в нее второй, правда, с меньшим стоком, реки Тешебс. Ее воды значительно отличаются высоким содержанием общего и нитратного азота (см. табл. 3.2.1). Но разделить вклад отдельных рек в формирование гидрохимических полей бухты сложно.

В бухте Вулан проводились работы (4.05.2007) с борта НИС «Акванавт». Гидрохимические наблюдения в полном объеме были сделаны на разрезе напротив устья р. Вулан. По берегам бухты и в устьях рек одновременно с работами на разрезе были отобраны 7 проб (см. табл. 3.2.1). Воды р. Вулан отличались высокой величиной общей щелочности (в среднем 4,17 мг-экв/л) и высоким содержанием растворенного кремния (более 100 мкг-ат/л). Это видно на распределении этих величин по разрезу (рис. 3.2.3). Для приустьевых участков было характерно также повышенное содержание фосфатов и аммонийного азота. Следует заметить, при

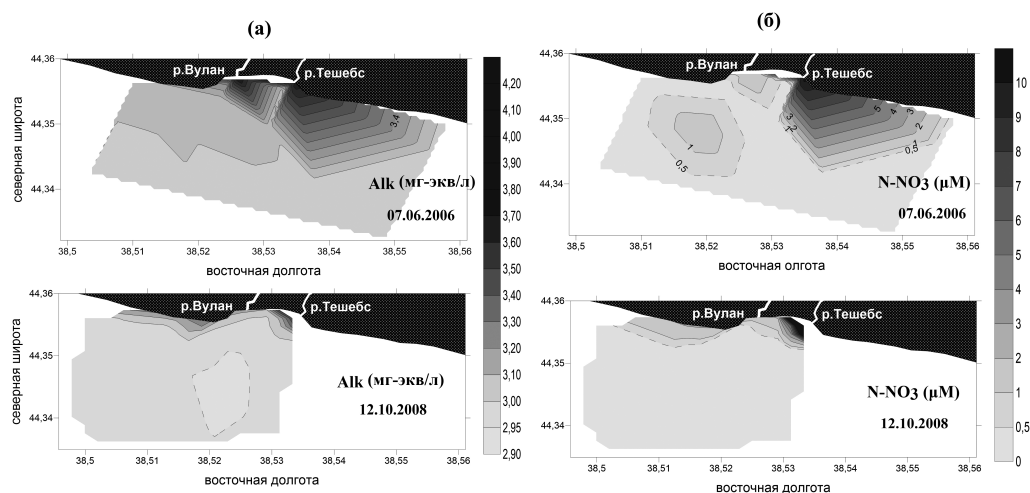


Рис. 3.2.2. Распределение в поверхностных водах бухты Вулан (07.06.2006 и 12.10.2008) а – величины общей титруемой щелочности (мг-экв/л); б – содержания нитратного азота (μM).

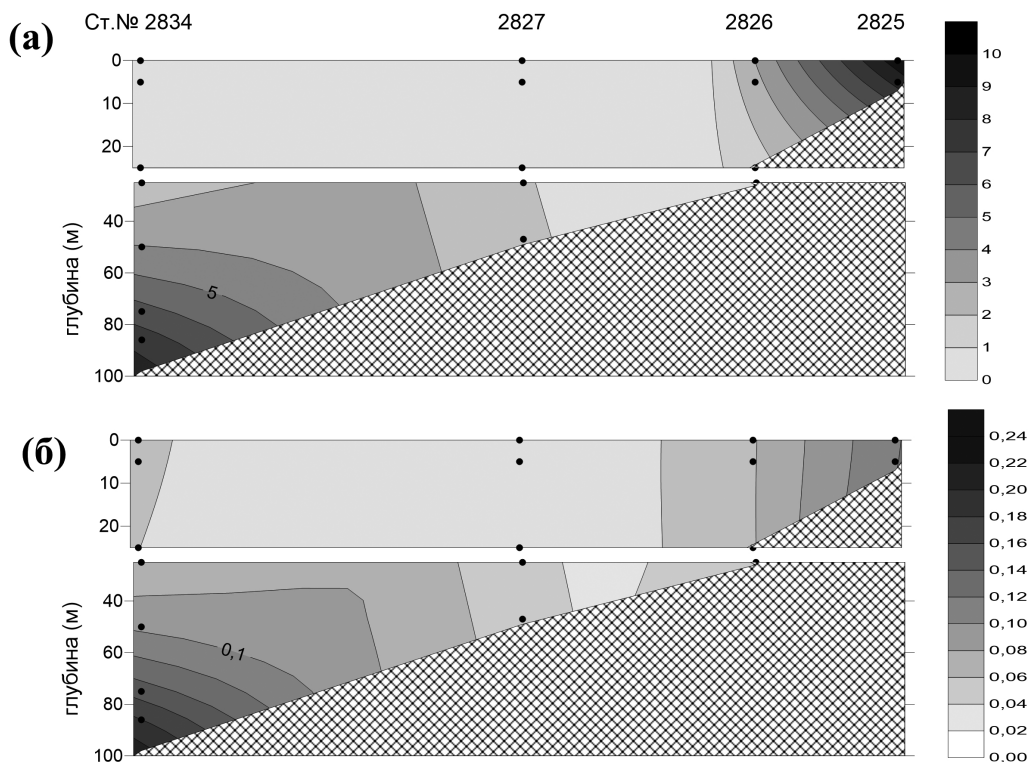


Рис. 3.2.3. Распределение на разрезе в приустьевом районе р. Вулан (4.05.2007) а – содержания растворенного неорганического кремния (μM); б – растворенного неорганического фосфора (μM).

работах в 2007 г. по распределению гидрохимических параметров мы наблюдали классический вертикальный эстуарный фронт.

Уже говорилось, что воздействие стока рек Вулан и Тешебс прослеживалось более чем на километр в направлении моря. Как и следовало ожидать, наибольшее проявление речного стока отмечено вдоль стержня струйного течения. Вдоль берега изменения химического состава вод отмечаются почти на 3 км к востоку от устья р. Тешебс. Результаты непрерывных записей содержания растворенного кислорода показали, что приустьевой зоне соответствует область с повышенным содержанием кислорода и повышенной величиной рН (рис. 3.2.4), которая, можно предположить, подпитывается принесенными биогенными элементами. В рассмотренном случае граница этой зоны локализована на расстоянии 1,5–2 км от устья реки.

Содержание растворенного кремния для речных вод исследованного района было незначительным. Наиболее вероятной причиной этого можно назвать то, что источником силикатов служат в основном воды поверхностного стока, в то время

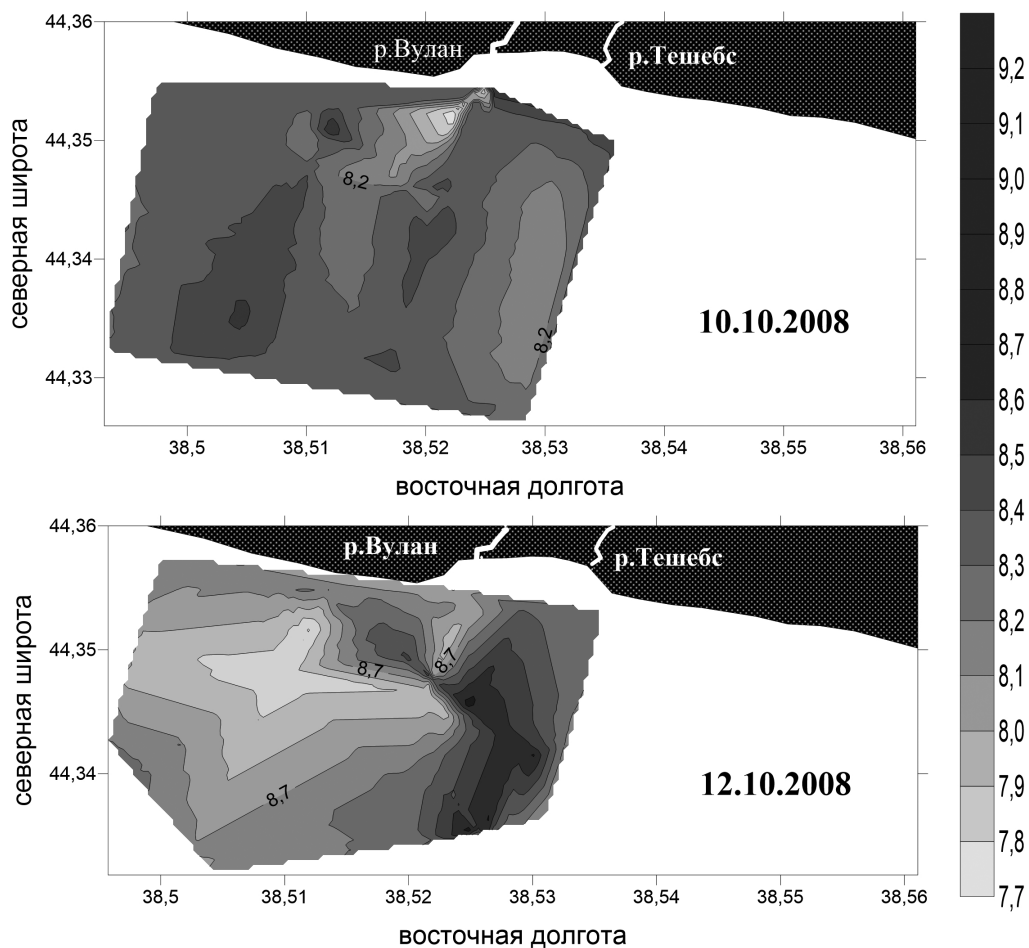


Рис. 3.2.4. Распределение содержания растворенного кислорода (мг/л) в поверхностных водах бухты Вулан по результатам съемок 10.10.2008 и 12.10.2008.

как карбонатный углерод в исследованном районе поступает в речной сток с подземным питанием. Воды, впадающие в бухту Вулан, обладают повышенной величиной общей щелочности и растворенного неорганического углерода. По результатам съемок 2006, 2007 и 2008 гг. видно, что даже в период летнего ослабления стока в 2006 г. след речных вод по щелочности прослеживался гораздо дальше, чем в период осенней межени в 2008 г. Интересно, что пробы, взятые напротив практически сухого устья р. Тешебс, были обогащены карбонатным углеродом значительно больше, чем воды, взятые напротив устья р. Вулан. Это указывает

на важную роль фильтрации в воздействии рек на химический состав вод прибрежной зоны. Сходная ситуация наблюдалась в 2006 г., когда власти пос. Дивноморское полностью закрыли выходную протоку р. Мезыбь на местном пляже при помощи бульдозеров. Об этой ситуации речь пойдет ниже.

Зимой в воде р. Вулан значительно возросло содержание растворенного фосфора, главным образом за счет его минеральных форм. Сильно увеличивалось и содержание общего растворенного азота, причем содержание нитратного азота зимой даже снижалось, а нитритного практически не изменялось. Видимо, рост содержания азота происходил за счет органического азота и восстановленных его форм. Величина общей щелочности, содержание растворенного кремния и неорганического углерода практически не испытывали изменений (см. табл. 3.2.1).

Приустьевая область р. Мезыбь

Среднемноголетнее значение стока р. Мезыбь составляет $0,12 \text{ км}^3$ в год, или $3,9 \text{ м}^3/\text{с}$ [Джоашвили, 2003]. Однако во время измерений (7.06.2006) объем стока был крайне низким. При предварительной разведке устья было установлено, что сток составлял около $1 \text{ м}^3/\text{с}$. Но между 5 и 7 июня власти пос. Дивноморское полностью закрыли выходную протоку реки на местном пляже при помощи бульдозеров, в результате к моменту нашей съемки поверхностный сток был сведен практически к нулю. Но, судя по определениям воды, недалеко от береговой черты при этом, тем не менее, сохранялся небольшой остаточный подземный сток. На это указывают полученные результаты измерений гидрохимических параметров.

По данным ADP-зондирования, поле течений в приустьевой области р. Мезыбь имело антициклоническую форму при масштабе вихря около 1 км. Вблизи берега течение было направлено на восток со средней скоростью 10–20 см/с. Несмотря на крайне малый сток, приустьевая зона опреснения была обнаружена, но ее размеры (200–500 м) и снижение солености в ней (всего около 0,03 PSU по отношению к «фону») оказались значительно меньшими, чем в приустьевых районах Пшады и Вулана. Плюм вытянут вдоль берега на восток, что соответствует характеру локальной циркуляции района (рис. 3.2.5).

Несмотря на то, что устье реки было перекрыто гравийной насыпью, распределение кислорода и рН в поверхностных водах показывало, что просачивание воды (трудно по-другому назвать характер стока реки) вызывает повышение биологической активности вод. На расстоянии 400–500 м от засыпанного устья реки наблюдалась полоса вод с повышенными величинами рН и содержанием растворенного кислорода, хорошо совпадавшая с зоной повышенного содержания хлорофилла. Видимо, даже такого небольшого количества выноса биогенных элементов хватает для инициации активного цветения вод. Ширина этой зоны повышенного содержания кислорода и величины рН колеблется от 100 до 500 м.

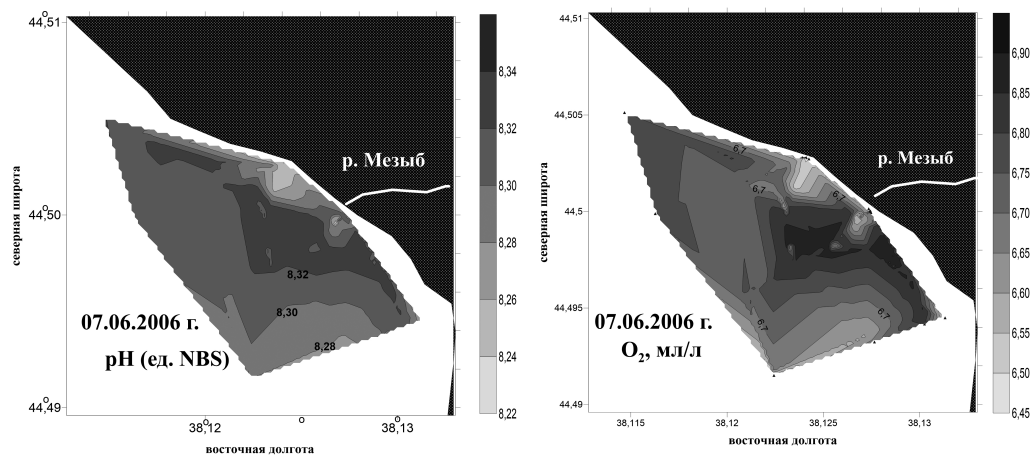


Рис. 3.2.5. Распределение величины pH (единицы NBS) и содержания растворенного кислорода (мг/л) в поверхностной воде приустьевой области р. Мезыбь (07.06.2006).

Так же как и в приустьевых участках других рек, сток р. Мезыбь приводил в поверхностных водах приустьевого района к увеличению содержания растворенного кремния, растворенного неорганического и общего фосфора. Влияние реки прослеживалось приблизительно на 500 м как в сторону открытого моря, так и вдоль берега. Степень как временной, так и пространственной изменчивости гидрохимических параметров была очень велика. Так, на одной из станций за 4 минуты температура поверхностной воды повысилась более чем на 0,5°C, на 0,35 мг-экв/л выросла величина общей щелочности, в три раза увеличилось содержание растворенного кремния, несколько поднялась величина pH. Содержание растворенного кислорода и общего и минерального фосфора уменьшилось, но незначительно.

По гидрохимическим показателям влияние стока прослеживалось главным образом в поверхностных водах. На горизонте 2 м вода становилась уже более «морской», увеличивалась соленость, уменьшалась величина общей щелочности и содержания растворенного кремния, увеличивалось содержание растворенного кислорода.

Приустьевая область речки Ашамбы

Измерения на приустьевом участке р. Ашамбы (бухта Голубая и прилежащая к ней часть шельфа) были выполнены 9 июня 2006 г. За сутки до этого прошли значительные ливневые осадки. Вследствие этого сток р. Ашамбы оказался зна-

чительным (до 3–4 м³/с). Основное влияние выноса речных вод на гидрологическую и гидрохимическую структуры поверхностных вод были локализованы в западной части Голубой бухты. Так, концентрация хлорофилла в плюмаже реки Ашамбы вчетверо превышает фоновые значения вне бухты. Обращал на себя внимание острый фронт между водой с примесью речного стока и чистыми водами моря, находящийся в нескольких сотнях метрах мористее выхода из бухты. Характер распределения указывает на то, что взвесь, связанная со стоком Ашамбы, переносится вдоль берега к востоку, в сторону м. Тонкого и Геленджикской бухты.

Химический состав вод р. Ашамбы в первую очередь характеризуется очень высоким содержанием карбонатного углерода и, естественно, высокой величиной общей щелочности. Это связано с тем, что в бассейне реки распространены выходы известковых пород. На состав вод реки сильное влияние оказывают сельскохозяйственные и бытовые стоки, с чем связано высокое содержание всех форм азота и растворенного органического фосфора (см. табл. 3.2.1).

Река Туапсе

Река Туапсе относится к малым рекам, годовой объем ее стока порядка 0,3–0,5 км³. Работы в приустьевом районе реки выполнялись в ходе экспедиции на НИС «Акванавт». Во время работ (3.05.2007) были выполнены 3 разреза перпендикулярно к берегу. Средний разрез выполнен напротив устья реки, другие – в 2 км западнее (верхний разрез на рис. 3.2.6) и восточнее (нижний разрез на рис. 3.2.6) устья. Распределение кислорода на разрезах в поверхностном слое до 25 м было ровное и малоградиентное. Также достаточно равномерно была распределена и величина рН. Высокое содержание кислорода (до 7,15 мл/л) и величины рН, превышающие в верхнем слое вод 8,5 ед., свидетельствуют о достаточно высокой активности фотосинтетической деятельности фитопланктона.

Зона выноса речных вод наиболее хорошо выражена по пониженным величинам общей щелочности (см. рис. 3.2.6). Однако повышение содержания кремния в прибрежных водах слабо прослеживалось только на восточном разрезе. Влияние речного стока практически не отразилось на распределении фосфатов и аммонийного азота. Максимум содержания аммонийного азота наблюдался в мористой части разрезов. Видимо, утилизация бытовых и техногенных стоков практически полностью проходит в акватории ковша туапсинского порта. Во время работ мы не имели возможности подойти близко к устью реки. Поэтому воздействие речного стока на гидрохимическую структуру вод слабо проявлялось на разрезах. Наибольшее воздействие наблюдалось на восточном разрезе, куда, видимо, и относилась основная струя речных вод. Определения, выполненные по ходу судна, практически напротив устья реки, показали рост содержания растворенного кислорода и величины рН, вызванные, скорее всего, увеличением растворимости

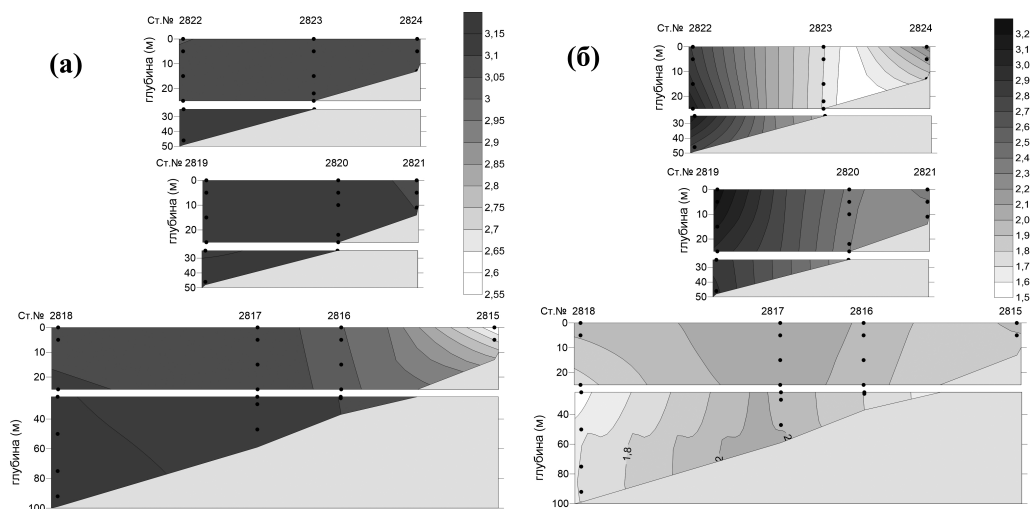


Рис. 3.2.6. Распределение на разрезах в приустьевом районе р. Туапсе (3.05.2007) а – величины общей титруемой щелочности (мг-экв/л); б – аммонийного азота (µM).

кислорода при понижении температуры воды. На расстоянии 2000–2500 м на фоне общего повышения температуры величины рН и содержание растворенного кислорода возрастали, при дальнейшем удалении от устья наблюдалось их снижение до величин, характерных для прибрежных вод.

Сочи-Адлеровский район

Исследованный в 2009–2014 гг. район Большого Сочи (от устья р. Мзымты до устья р. Бытха) оказался наиболее интересным объектом. Неслучайно этому району было уделено так много экспедиционного времени. Этот район подвержен очень сильному антропогенному воздействию из-за бытовых и техногенных стоков Сочинской агломерации. Фактически был проведен 6-летний мониторинг прибрежных вод в этом районе [Завьялов, Маккавеев, 2014]. Получены уникальные данные, указывающие, в частности, на усиление антропогенного воздействия на прибрежную зону во время строительства объектов Сочинской Олимпиады.

В пределах Большого Сочи в море впадает ряд средних и малых рек. Этот район особенно интересен для исследования: реки, впадающие здесь в море (Мзымта, Кудепста, Сочи, Битха и др.), значительно отличаются друг от друга по морфологическим характеристикам и по степени антропогенной нагрузки, что отражается на химическом составе вод [Kostyleva et al., 2011]. Состав речного стока в исследованном районе был очень разнообразным, причем состав менялся не

только от реки к реке, но и в каждой реке в зависимости от расстояния от истока, от изменения метеорологической обстановки и других факторов.

Практически все экспедиции осуществлялись в один и тот же сезон – май или первые дни июня, который в этом районе обычно соответствует паводковому стоку рек. Находящиеся на относительно небольшом участке побережья воды этих рек в зависимости от гидрометеорологической обстановки могут контактировать друг с другом, смешиваться между собой и с морской водой [Завьялов, Маккавеев, 2014].

Река Мзымта

Мзымта – самая крупная и многоводная река, впадающая в Черное море на территории России. Исток реки находится на южном склоне Главного Кавказского хребта на высоте 2980 м над уровнем моря в Мостовском районе Краснодарского края. Высшая точка бассейна реки – гора Агепста (3256 м). В своих верховьях Мзымта впадает в высокогорные озера Верхний Кардывач (2472 м) и Кардывач (1838 м). В нижнем течении долина Мзымты расширяется и река принимает равнинный характер [Борисов, 1978]. На всем протяжении реки в нее впадают многочисленные притоки (Ачипсе, Лаура, Пслух, Чвижепсе, Кепша, Тихая и другие, менее значительные). Режим стока реки паводочный, с хорошо выраженным половодьем в теплый период года, часты осенние паводки, зимой наблюдается устойчивая межень. В верховьях р. Мзымты практически все лето лежит снег и питают Мзымту небольшие ледники, фирновые снеговые поля. Бассейн реки в верхнем течении очень богат родниками и источниками, вклад которых в питание реки особенно заметен в меженный период. В равнинной части возрастает роль дождевого и грунтового питания. Минерализация вод Мзымты меняется от 50 мг/л в верховьях до 200 мг/л в среднем и нижнем течении [Борисов, 1978]. Река Мзымта имеет годовой объем стока около 1,6 км³, наибольший из всех исследованных в экспедиции рек. Несомненно, что и ее воздействие на гидрохимический и гидродинамический режимы прибрежной акватории будет наиболее значительным из всех исследованных нами рек.

Для р. Мзымты характерно пониженное (по сравнению с морской водой) содержание карбонатного углерода, что отражается на величине общей щелочности, которая, естественно, ниже, чем в морских водах. Бедность карбонатами Мзымты скорее всего обусловлена ее снегово-ледниковым происхождением [Вивчар, 2010; Ресурсы..., 1969; Лурье, 2002]. Химический состав вод Мзымты отличается от Кудепсты и Сочи повышенным содержанием силикатов, что может быть объяснено обилием в бассейне Мзымты диорита и гранита [Диденко, 2006]. Высокое относительно приемного водоема содержание силикатов и низкое карбонатного углерода отражаются и на распределении этих параметров в приустьевом участке (рис. 3.2.7). Значительная загрязненность вод Мзымты бытовыми стоками прояв-

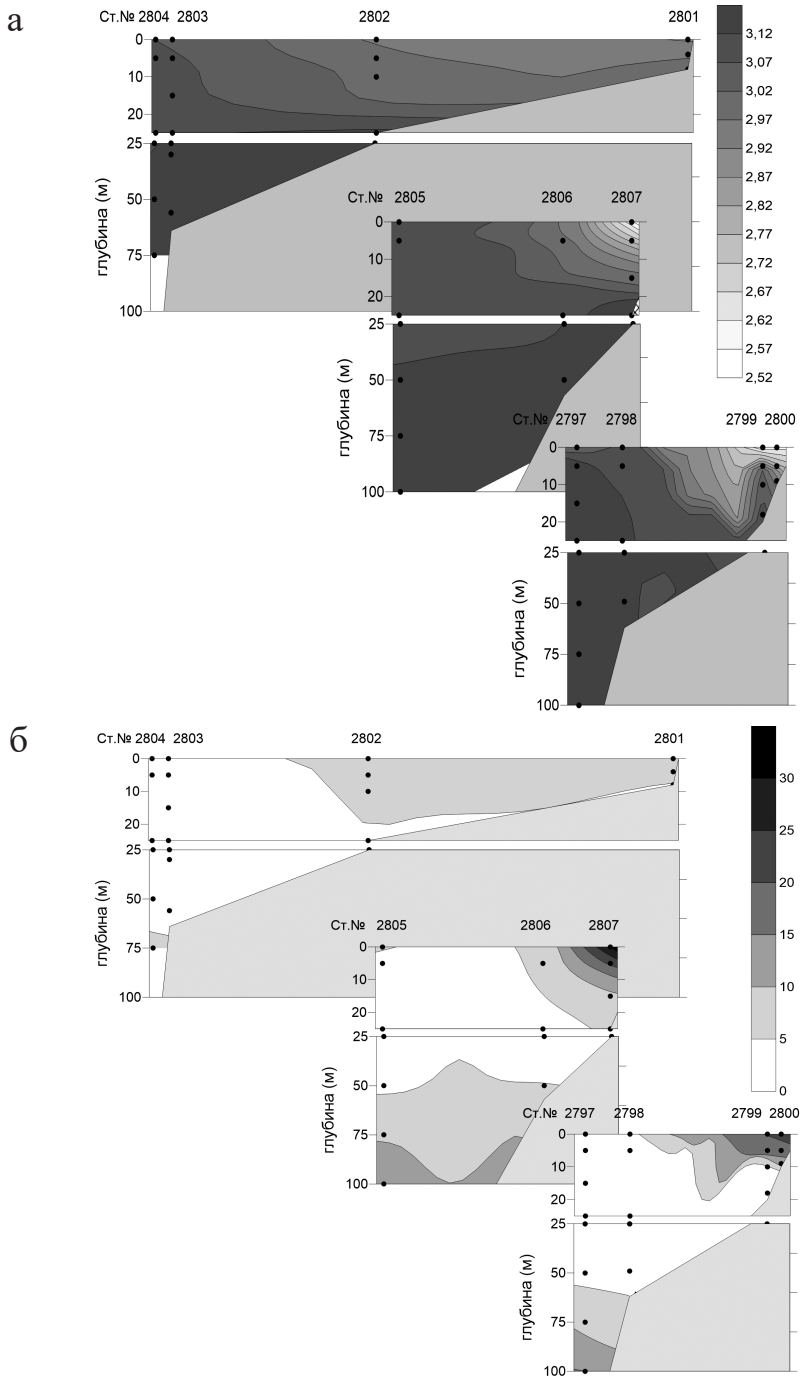


Рис. 3.2.7. Распределение на разрезах в приустьевом районе р. Мзымта (1.05.2007) а – величины общей титруемой щелочности (мг-экв/л); б – растворенного кремния (μM).

ляется на разрезах повышением содержания растворенного фосфора (как общего, так и минерального) и аммонийного азота (см. табл. 3.2.1).

В период наблюдений четко была видна граница между морской (соленой и прозрачной) и речной (пресной и мутной) водой. При пересечении подобной границы катером проточная CTD-система показывала скачкообразное понижение солености, начинавшееся с уровня в 13,5 PSU. Вертикальные измерения зондом CTD, проведенные в пределах плюма, показали, что на нижней его границе формировался острый пикноклин также на уровне солености 13,5 PSU. Таким образом, критерием определения области, занимаемой плюмом, была принята соленость воды, меньшая 13,5 PSU. Вдольбереговая протяженность плюма за время наблюдений менялась от нескольких сотен метров до 8,5 км, а понижение солености в приустьевой части плюма от 0,8 до 3,5 PSU. Область опреснения стоком реки Мзымты достигала максимального пространственного развития в период ветра южных и юго-восточных румбов. Можно отметить некоторое постоянство формы речного плюма в период наблюдений, как правило, он был вытянут вдоль берега в юго-восточном направлении.

На основе данных, полученных в экспедициях 2009–2014 гг., были выявлены некоторые зависимости параметров плюма р. Мзымты от внешних воздействий. Длина и ширина плюма увеличивались при росте вдольбереговой компоненты ветрового вынуждения, направленной на северо-запад. Также наблюдалась положительная связь между вдольбереговым напряжением трения ветра и площадью плюма. Кроме того, площадь плюма увеличивалась и при росте вдольбереговой компоненты течения [Завьялов и др., 2014].

Как говорилось выше, состав речного стока в исследованном районе был очень разнообразным. Результаты гидрохимических анализов различных участков русла р. Мзымты и ее притоков приведены в табл. 3.2.1. Видно, что несмотря на ограниченную площадь водосбора химический состав реки и ее притоков различаются очень сильно. Меняется химический состав вод и в отдельных частях водотоков. Так, в Мзымте даже отличался состав вод, взятых с левого и правого берега одного створа в приустьевом районе, что свидетельствует о неоднородности водного потока по ширине реки (струйности). Кроме того, отчетливо прослеживается антропогенная составляющая химического стока, особенно при впадении канала на Имеретинской низменности и ручья в районе сочинского дельфинария. Изменение гидрохимического состава вод Мзымты от истоков до входа в городскую черту (гидропост Казачий брод) определяется в основном химическим составом вод притоков. А в нижнем течении химический состав вод определяется, главным образом, интенсивностью антропогенного воздействия.

Необходимо отметить, что по некоторым показателям ситуация, по-видимому, ухудшалась год от года на наших глазах. Так, среднее содержание терригенной взвеси в морской воде вблизи устья Мзымты, по нашим измерениям, неуклонно росло, и более чем удвоилось за 6 лет – возможно, в связи с олимпийским строительством

[Завьялов, Маккавеев, 2014]. То же самое относится, например, к концентрациям кремния и нитритов. А вот содержание в воде растворенного кислорода, наоборот, уменьшилось, и сегодня приходится констатировать на некоторых приустьевых участках моря состояние придонных вод, близкое к гипоксии (дефицита кислорода или полного его исчезновения), что не может не сказываться отрицательно на функционировании экосистемы и жизнедеятельности биологических сообществ [Завьялов, Маккавеев, 2014]. Наши данные относятся к ограниченному числу точечных измерений, выполнявшихся главным образом в весенний период, поэтому они, конечно, однозначно не доказывают существования однонаправленных межгодовых трендов. Но следует заметить, что содержание того или иного параметра может в разы меняться в зависимости от величины стока, характера увлажнения бассейна водосбора и, следовательно, от сезона. Даже примерно в один и тот же сезон разброс наблюдавшихся величин может быть очень широким (что видно из табл. 3.2.1).

Река Сочи

Сочи – третья по длине река в районе Большого Сочи после Мзымты и Шахэ. годовой объем стока реки 0,3–0,5 км³. Исток реки находится на южном склоне Главного Кавказского хребта у подножия горы Большая Чура на высоте около 2000 м над уровнем моря. Почти половина ее бассейна лежит на высоте более 1000 м [Борисов, 1978]. Основные притоки реки: Игошка 1-я, Ушха, Ац, Агва, Ажек [Тарчевский, 2008].

Питание реки Сочи смешанное. Весной оно происходит за счет таяния снегов, летом и осенью за счет дождей. Также реку питают грунтовые воды. Водный режим реки Сочи – паводковый. Весной паводок длится 40–50 дней. Половодье на реке Сочи происходит из-за таяния снегов в верховьях бассейна водосбора. Летом разливы реки происходят от выпадения обильных дождей. В течение года на реке Сочи происходят значительные колебания уровня вод. В нижнем течении река протекает в черте Центрального района города Сочи, что накладывает негативный отпечаток на качество вод. Здесь ее берега укреплены бетоном [Борисов, 1978].

Напротив устья р. Сочи у Морского вокзала города Сочи мы наблюдали распресненную область, которая представляет собой часть плюма реки. В отличие от плюма Мзымты, вода в нем характеризуется высокой мутностью. Общая картина распределения гидрохимических параметров на разрезе сходна с распределением на разрезах в районе р. Мзымты. Воздействие речного стока проявлялось в уменьшении содержания величины общей щелочности и увеличении содержания растворенного неорганического кремния.

Во время 100-го рейса НИС «Профессор Штокман» в марте 2009 г. были выполнены работы на разрезе вблизи устья р. Сочи (рис. 3.2.8). Для разрезов характерно очень низкое содержание биогенных элементов в верхнем 30–50-метровом

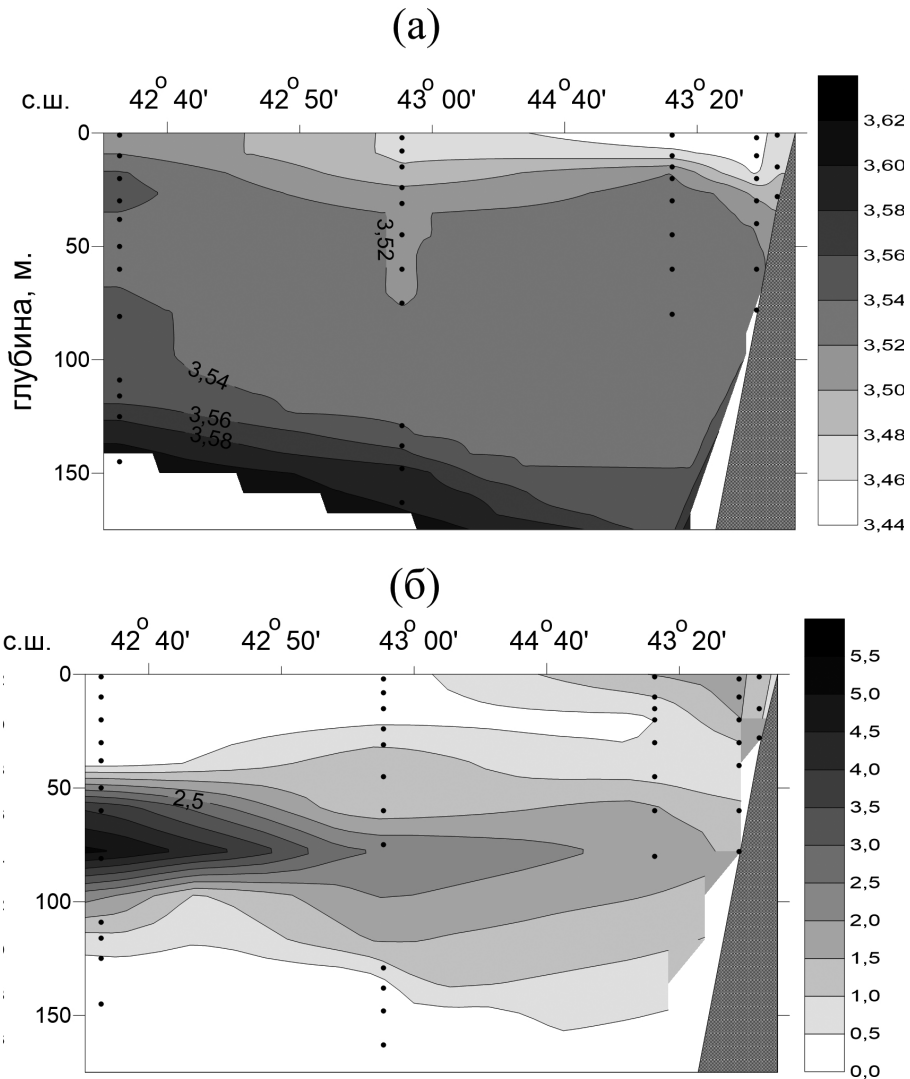


Рис. 3.2.8. Распределение на разрезах в приустьевом районе р. Сочи (18-19.03.2009) а – величины общей титруемой щелочности (мг-экв/л); б – аммонийного азота (μM).

слое, за исключением их прибрежной части, где влияние материкового и бытового стока приводило к повышению содержания азота, особенно в нитритной форме, и небольшому повышению содержания фосфатов. Содержание фосфатов и нитратного азота для поверхностных вод в большинстве случаев было ниже предела определения (аналитический нуль), что не могло не оказывать лимитирующего

действия на развитие фитопланктона. О низкой биологической активности говорят и то, что насыщение поверхностных вод кислородом в редких случаях превышало 100% (в максимуме всего 103%). Создается впечатление, что либо не произошло зимнего увеличения содержания биогенных веществ в деятельном слое моря, либо весеннее цветение уже прошло и дальнейшее развитие фитопланктона подавлено недостатком питательных веществ.

Плюм р. Сочи во время работ 2012 г. был отмечен только в непосредственной близости от устья, его линейный масштаб составлял порядка 1 км. Несмотря на малый уровень стока толщина плюма р. Сочи составила 4 м, а аномалия солёности в плюме – до 3 PSU. Река Сочи находится под очень сильным антропогенным воздействием. Воды обогащены преимущественно азотом в различных формах. Но содержание растворенного неорганического фосфора в воде р. Сочи невысокое и практически не отличается от «фонового», свойственного морским водам. Это и отражается на составе поверхностных вод района. Зона распространения «плюма» характеризуется повышенным содержанием нитратного, нитритного и аммонийного азота и практически не выделяется по фосфору.

Река Кудепста

Если Сочи и Мзымта относятся к средним рекам, то Кудепста и Битха – к малым. В высотной зоне изучаемого района до 1000 м талый сток составляет 7%, дождевой – 74%, подземный – 19% [Лурье, 2002]. Поэтому для рек Кудепста и Битха дождевой сток является основным источником питания. Река Кудепста берет начало на южных склонах хребта Алек у горы Ефрем недалеко от поселка Воронцовка Сочинского района. Питают Кудепсту ливневые дожди и быстро стаивающий снег. У Кудепсты – паводковый режим вод, особенностью которого является высокий и резкий подъем уровня вод во время таяния снегов и после выпадения обильных осадков [Ресурсы..., 1969].

Во время паводков в составе химического стока реки происходит увеличение содержания в воде азота в различных формах и содержания растворенного кремния. Уровень содержания карбонатного углерода для р. Кудепсты значительно выше, чем для р. Мзымты. Но интересно, что содержание растворенного кремния и величина щелочности в воде Кудепсты меняются во времени в значительно меньших пределах, чем содержание других гидрохимические параметров. Видимо, основной источник карбонатного углерода и кремния – подземные воды, величина стока которых остается практически постоянной вне зависимости от фазы гидрологического режима реки. В наибольшей степени изменяется во времени содержание фосфора и азота. Сильно изменяется и величина рН, что может быть связано с изменением количества взвешенного и растворенного органического вещества в речном стоке.

Как правило, в приустьевом районе р. Кудепсты содержание кислорода было невысоким (рис. 3.2.9). Это может объясняться, во-первых, тем, что область повышенного содержания кислорода в приустьевом районе Кудепсты может быть смещена к северо-западу за пределы района работ. Во-вторых, при выпадении осадков в районе водосбора воды Кудепсты несли большое количество взвеси, в том числе, видимо, и органических веществ. Это могло привести к тому, что интенсивность процессов окисления органического вещества была значительно выше продукционных процессов. В зимний период величина общей щелочности менялась не сильно, но содержание биогенных элементов резко возрастало, достигая для фосфатов 9,6 а для нитритов 4,9 мкг-ат/л. Такое увеличение свойственно рекам умеренных и высоких широт в условиях зимней межени, когда в их питании возрастает роль подземных источников.

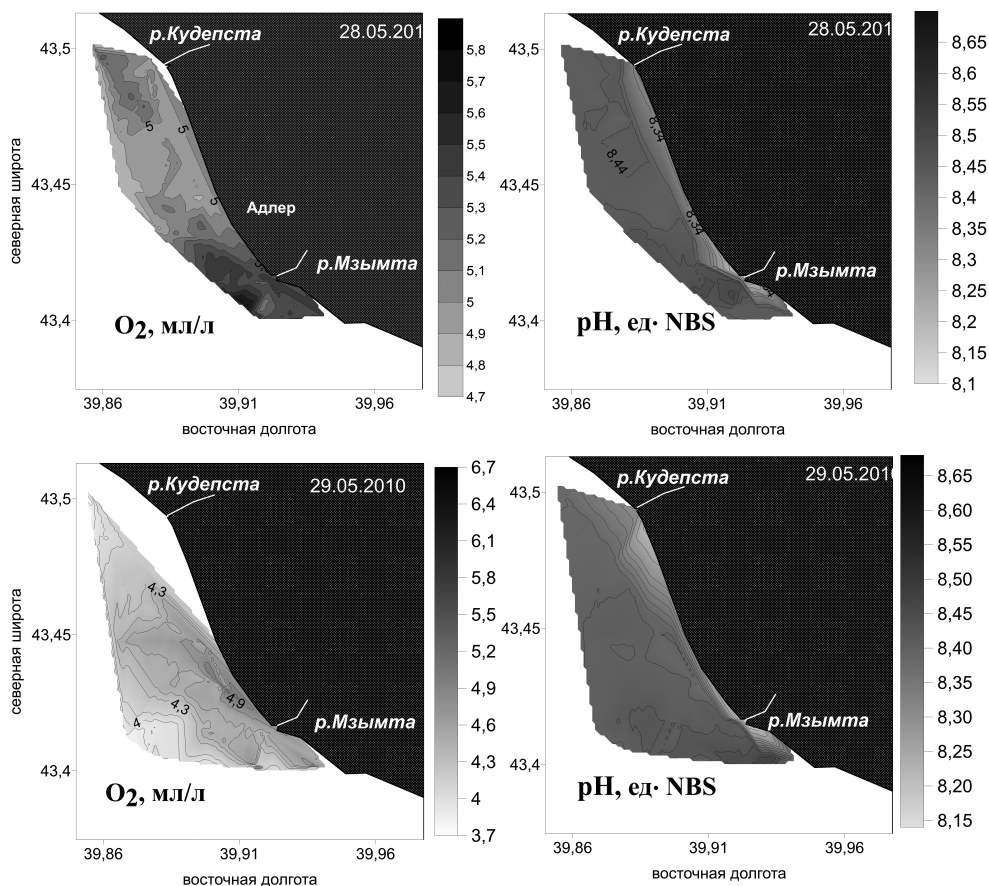


Рис. 3.2.9. Распределение содержания растворенного кислорода (мг/л) и величины pH (единицы NBS) в поверхностной воде приустьевой области рек Мзымты и Кудепсты (28 и 29.05.2010).

Река Бытха

Исток реки Бытхи находится примерно в 4 км от берега моря в районе поселка Верхнее Уч-Дере. В 1,5 км от своего устья Бытха протекает вблизи от полигона твердых бытовых отходов поселка Лоо. Отсутствие очистных сооружений на р. Бытхе приводит к значительному воздействию бытовых стоков на прибрежную морскую экосистему. Влияние р. Бытхи на гидрохимическую структуру прибрежных вод прослеживается очень отчетливо, несмотря на небольшие размеры водотока, и связано это, скорее всего, с влиянием упомянутой выше свалки бытовых отходов.

В море река впадает менее чем в 200 м от пляжа санатория «Белые ночи», расположенного в поселке Уч-Дере. Плюм р. Бытхи имеет стойкую ярко-коричневую окраску, резкий запах, концентрация растворенной органики в нем превышает фоновые морские значения более чем в 20 раз, металлов – почти в 100 раз, аммиака – в 300 раз. В 2014 г впервые отобраны пробы по всей длине реки, являющейся особенно показательным объектом для изучения влияния жизнедеятельности человека на водохозяйственные объекты. В своих верховьях река не сильно загрязнена, а непосредственно у истока – можно сказать что чистая (см. табл. 3.2.1).

Плюм р. Бытхи в период наблюдений был вытянут вдоль берега в юго-восточном направлении на 1 км. Несмотря на малый уровень стока, толщина плюма Бытхи составила 3,5 м, а аномалия солености в плюме – 12 PSU. Эта речка ответственна за значительный приток в море растворенных органических веществ [Костылева, 2015]. Общая концентрация растворенных органических веществ в морской воде вблизи устья речки превышает фоновые значения более чем в 15 раз, концентрация фосфатов превышает фоновые значения почти втрое, концентрация кремния – в 18 раз, а концентрация аммонийного азота – почти в 40 раз (рис. 3.2.10).

В зимний период величина общей щелочности менялась не сильно, но содержание биогенных элементов достигало экстремальных значений – для фосфатов 6,2 мкг-ат/л, нитритов 3,1 мкг-ат. Высокие значения общей титруемой щелочности в поверхностных водах, в отличие от вод Кудепсты, обусловлены не высоким содержанием карбонатного углерода в речной воде (см. табл. 3.2.1), а значительным вкладом в величину щелочности аммонийной, силикатной и фосфатной составляющих.

Река Хоста

Река Хоста образуется при слиянии рек Большая Хоста и Малая Хоста на высоте около 40 м над уровнем моря, обе берут начало на южном склоне Большого Кавказа. Длина реки составляет 45 км, площадь водосборного бассейна – 96,2 км². Средний расход воды 5 м³/с. Плюм р. Хосты во время наблюдений (май 2013 г.) был вытянут вдоль берега в северо-западном направлении на 1,5 км. Толщина опресненных вод плюма Хосты составила 2,5 м, а аномалия солености в плюме – 4 PSU.

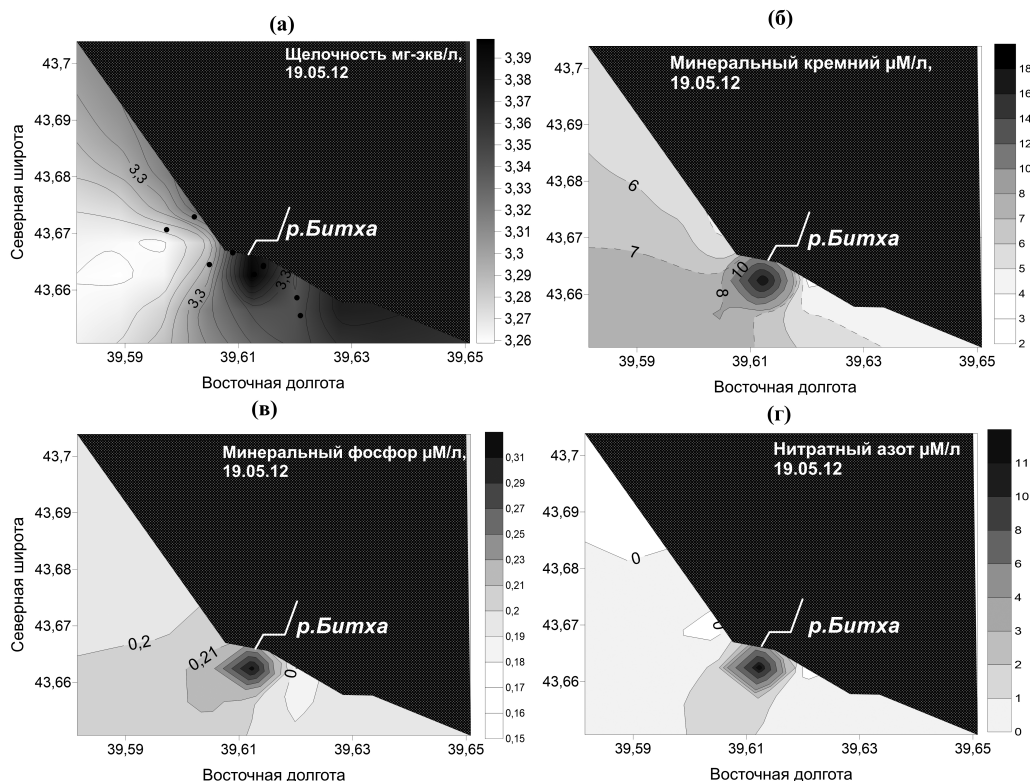


Рис. 3.2.10. Распределение в поверхностных водах приустьевое участка р. Бытхи (19.05.2012) а – величины общей титруемой щелочности (мг-экв/л); б – содержания растворенного кремния (μM); в – содержания растворенного минерального фосфора (μM); г – содержания нитратного азота (μM).

Воздействие р. Хосты на гидрохимический режим прибрежной акватории можно охарактеризовать как «нормальное» для данного района. Распространение речных вод сопровождалось понижением величины общей щелочности, повышенным содержанием растворенного неорганического кремния. В приустьевом районе в поверхностных водах наблюдалось значительное повышение всех форм растворенного азота и растворенного неорганического фосфора. Величина pH в приустьевом районе была повышена (рис. 3.2.11).

Особенности речного стока Большого Сочи

Как говорилось выше, реки, впадающие здесь в море в пределах Большого Сочи (Мзымта, Кудепста, Сочи, Бытха и др.), значительно отличаются друг от

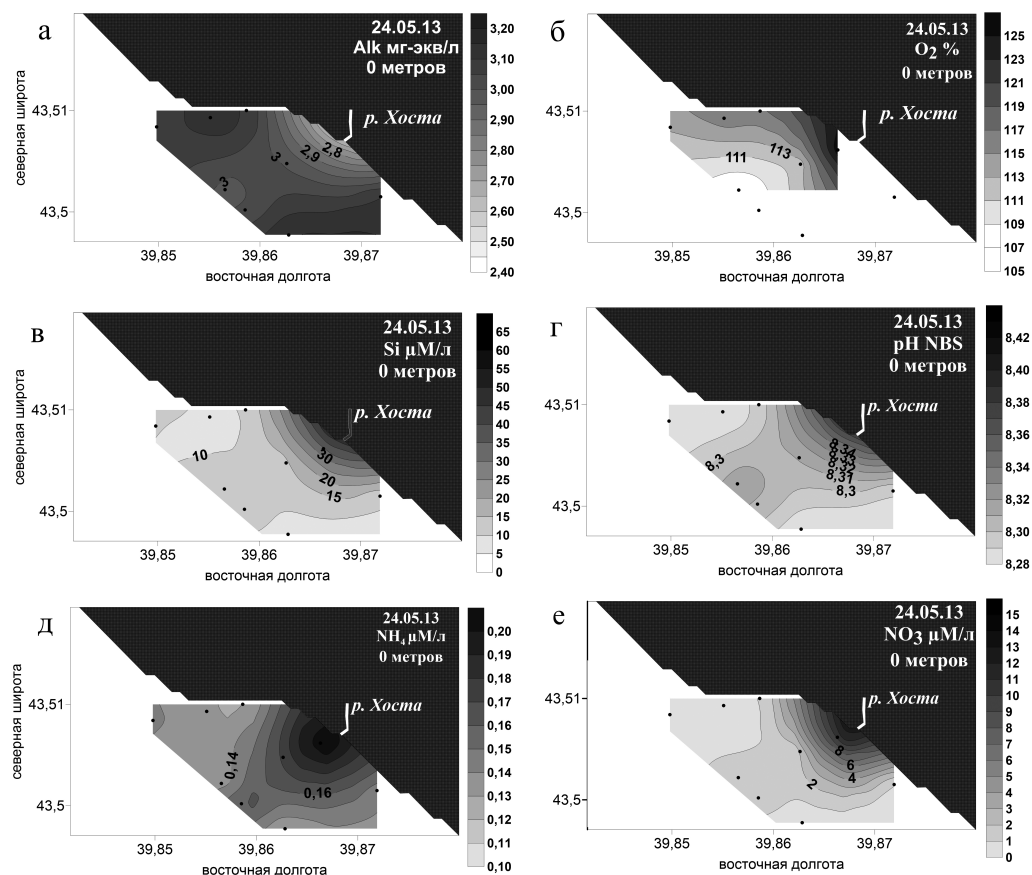


Рис. 3.2.11. Распределение в поверхностных водах приустьевое участка р. Хосты (24.05.2013) а – величины общей титруемой щелочности (мг-экв/л); б – насыщения растворенного кислорода (%); в – содержания растворенного кремния (μM); г – величины pH (NBS); д – содержания нитратного азота (μM); е – содержания нитритного азота (μM).

друга по морфологическим характеристикам и степени антропогенной нагрузки, что отражается на химическом составе вод [Kostyleva et al., 2011]. Диапазон изменения величины щелочности, которая традиционно считается одним из основных элементов-трассеров распространения речных вод, был очень большим. За время наблюдений величина щелочности менялась от 0,916 мг-экв/л в воде р. Мзымты до 4,276 мг-экв/л в воде р. Цанык и еще больше в сильно загрязненных водах р. Бытхи (6,8–7,4 мг-экв/л). В прибрежных морских водах данного региона величина общей щелочности была от 3,00 до 3,40 мл-экв/л. Уровень содержания карбонатного углерода в реках разный: если для р. Кудепсты характерно повышенное его

содержание, то для р. Мзымты величина общей щелочности значительно ниже. Воздействие Мзымты проявлялось в пониженном содержании карбонатного углерода, который составляет большую часть общей щелочности вод. Щелочность воды Кудепсты была практически такой же, как в поверхностной морской воде, и в некоторых случаях несколько выше. Поэтому в непосредственной близости от ее впадения распределение Alk более ровное, без значительных экстремумов. Значительно менялось от реки к реке и содержание растворенного фосфора. Но для всех вод содержание кремния было намного выше, чем в поверхностных морских водах и, естественно, приустьевая зона всегда отличалась повышенным содержанием силикатов. Для каждой из рек в наибольшей степени изменялось во времени содержание фосфора и минерального азота. Сильно изменялась и величина pH , что может быть связано с изменением количества взвешенного и растворенного органического вещества в речном стоке.

Прибрежная зона между Мзымтой и Кудепстой – это один из наиболее интересных и наиболее плотно изученный район работ экспедиции. Основная особенность гидрохимии этого района состоит в том, что обе реки, впадающие в море, значительно отличаются друг от друга по химическому составу вод. Как уже неоднократно отмечалось, воды р. Кудепсты содержат много карбонатного углерода, в 4–5 раз больше чем р. Мзымта, и даже несколько больше, чем поверхностные воды моря в данном районе. Это отражается на распределении величины общей щелочности в поверхностных водах. Во все съемки поверхностные воды, примыкающие к устью р. Кудепсты, отличались повышенной величиной щелочности, а воды у устья Мзымты – пониженной щелочностью. Интересно, что с глубиной картина распределения общей щелочности на полигоне Мзымта–Кудепсты меняется практически на противоположную, приустьевому району р. Кудепсты соответствуют пониженные величины общей щелочности, а Мзымты, напротив, повышенные. Такое «зеркальное распределение» прослеживается и для гидрохимических параметров. Причины этого, видимо, надо искать в особенностях придонной циркуляции вод.

Различия в химическом составе вод позволяют исследовать распространение по прибрежной акватории вод от различных источников, следовательно, и представить пути распространения растворенных веществ (в том числе и поллютантов), поступающих с водами отдельных водотоков [Маккавеев и др., 2013]. Метод разделения вод различного происхождения, с использованием уравнения смещения для квазиконсервативных субстанций, был разработан и успешно применялся для других морей [Власова и др., 2005; Маккавеев и др., 2010]. В качестве примера подобных расчетов в прибрежной зоне Черного моря приведем результаты работ на полигоне между устьями Мзымты и Кудепсты. За годы работ в районе Сочи на этом полигоне площадная съемка выполнялась 15 раз. Эти реки прекрасно подходили для расчета доли вод различного происхождения в формировании поверхностного распресненного слоя.

Несомненно, схема переноса вод зависит от величины расхода (увлажнения бассейна водосбора) и в большей степени от гидрометеорологических условий в прибрежной зоне. На рис. 3.2.12 показаны относительные доли содержания вод Мзымты и Кудепсты, а также «фоновых» морских вод в метровом верхнем слое по полигону за отдельные дневные выходы. Эта величина рассчитывалась в предположении линейного перемешивания трех водных масс с использованием значения солености, содержания растворенного кремния и величины общей щелочности, заданными по измерениям в устьях обеих рек и открытом море вдали от устьев.

При ветрах северных румбов воды Мзымты как более многоводной реки распространяются почти по нормали к берегу и их влияние (содержание в поверхностных водах до 10%) прослеживается на расстоянии почти до 4 км от устья. Воды Кудепсты более прижаты к берегу и переносятся главным образом в юго-восточном направлении, но тоже прослеживаются вдоль берега почти на 3 км. Юго-восточный вдольбереговой ветер, в свою очередь, способствует формированию плюма, распространяющегося в северном направлении и имеющего наибольшую линейную протяженность (от устья Мзымты вплоть до района Кудепсты и далее). Однако площадь такого плюма не столь велика из-за его ограниченности пределами узкой прибрежной полосы. Плюмы такого типа в наибольшей степени способствуют аккумуляции загрязнений в прибрежной зоне. Они наблюдались примерно в 20% случаев.

Биохимическая активность вод района Большого Сочи была высокой, насыщение вод кислородом на поверхности составляло от 100 до 112%, исключение составлял приустьевой район р. Кудепсты, о причинах этого уже говорилось. Достаточно для развития фотосинтетических процессов было и содержание биогенных элементов. Можно предположить, что фотосинтетическая активность инициируется выносом водотоками биогенных элементов. Результаты непрерывных записей содержания растворенного кислорода показали, что устьевой области каждой из исследованных рек сопутствуют области с повышенным содержанием кислорода и повышенной величиной рН. По результатам наблюдений при непрерывной регистрации содержания кислорода, величины рН и гидрофизических параметров расстояние этой зоны находится в 1,5–2,0 км от устья реки. Можно предположить, что в этой части приустьевого участка существует область с повышенной биологической активностью, которая подпитывается принесенными биогенными элементами. Однако под влиянием динамических факторов эта область может смещаться или исчезать на некоторое время.

В районе выноса рек по мере увеличения солености концентрация биогенных элементов падает, а содержание растворенного органического вещества и хлорофилла «а», наоборот, увеличивается. Но отношение растворенного органического вещества к биогенным элементам увеличивается только в диапазоне солености от 4 до 16 PSU. Когда соленость начинает превышать 17 PSU, отношение растворенного органического углерода к биогенным элементам достигает максимальных величин и практически перестает зависеть от солености. Это позволяет предполо-

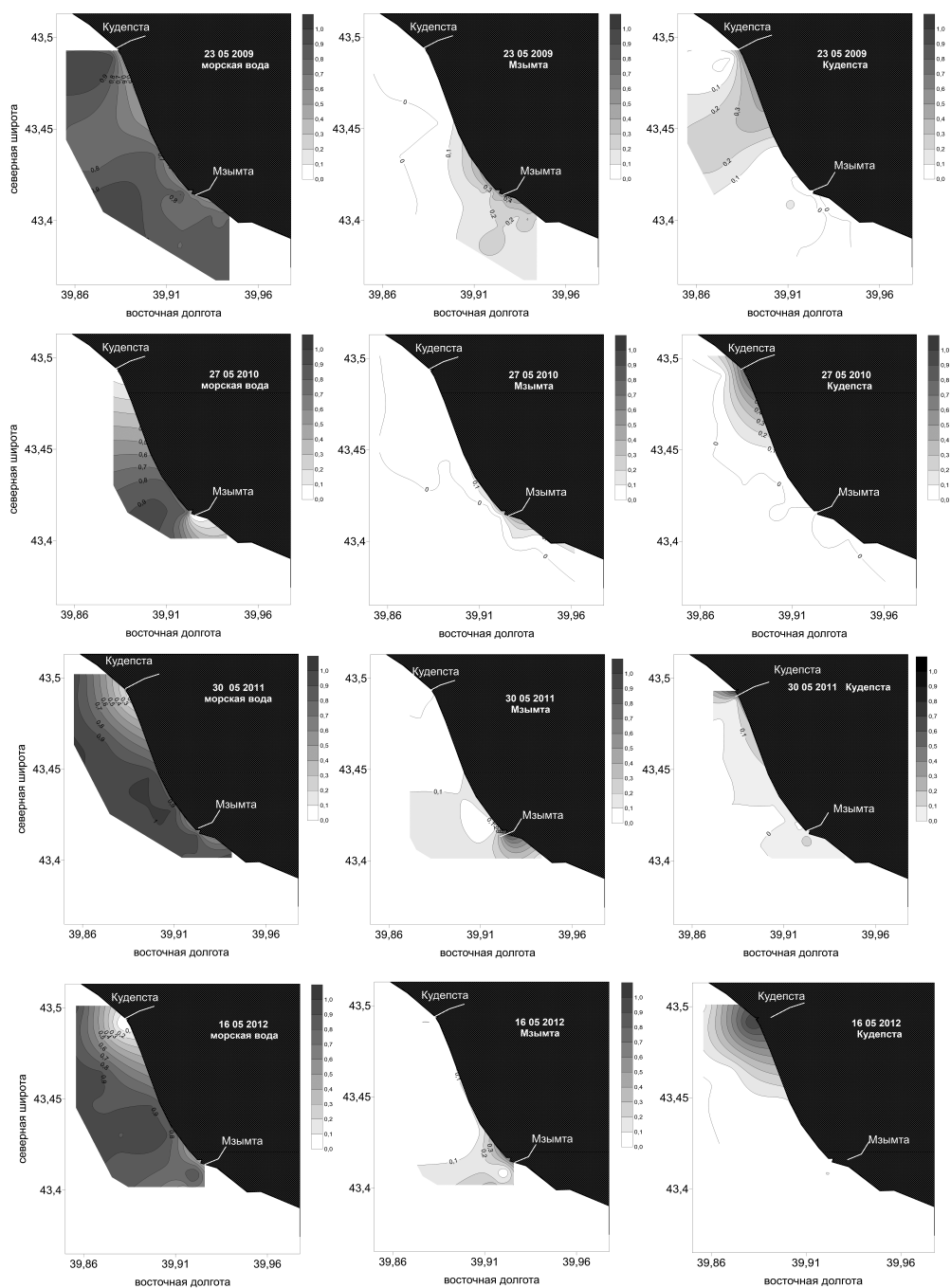


Рис. 3.2.12. Распределение морских вод и доли вод рек Мзымты и Кудесты в поверхностных водах по результатам различных съемок.

жить, что в районе выноса исследованных рек (Мзымты, Кудепсты и Сочи) имеет место «вторичное» накопление органики, связанное не с аллохтонным выносом органического вещества, а скорее со значительным поступлением из рек биогенных элементов, которые стимулируют развитие фитопланктона на мористой границе зоны смешения [Костылева, 2015].

В западной части этого района между устьями Мзымты и Кудепсты был обнаружен локальный максимум содержания нитратного азота и растворенного фосфора. Его отмечали на одном и том же месте в течение нескольких лет. Скорее всего, здесь наблюдалось окисление органического вещества, принесенного с бытовыми стоками г. Сочи. Часто в придонных водах этого района обнаруживались локальные максимумы содержания различных форм азота и растворенного фосфора. Причем доля недоокисленных форм азота (аммонийной и нитритной) достаточно велика, что свидетельствует об активном и относительно «молодом» окислительном процессе.

Во время всех экспедиций собирались пробы для анализа растворенных и взвешенных форм металлов. Проводился анализ содержания Fe, Mn, Cu, Zn, Ni в растворе и Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Pb во взвеси. Результаты анализов воды рек Мзымты, Кудепсты, Бытхи и др. показали, что, за исключением единичных случаев, концентрации растворенных форм металлов не превышали ПДК. Очевидных временных трендов за период наблюдений (2009–2014 гг.) установить не удалось. Исключением является небольшая речка Бытха, которая протекает через крупнейший в районе Сочи полигон бытовых отходов. Содержание тяжелых металлов во взвеси рек оказались близкими к типичным для взвеси незагрязненных рек Мира. Сравнение концентраций тяжелых металлов в воде и взвеси показало, что взвешенные формы, как правило, резко преобладают над растворенными. Однако при низкой мутности для таких металлов, как Cu и Zn, начинают преобладать растворенные формы. Анализ прибрежных морских вод и взвесей показал, что в большинстве случаев концентрации всех тяжелых металлов были ниже, чем в речных водах. Зависимости концентраций взвешенных тяжелых металлов от солености свидетельствуют об их нелинейном снижении в сторону моря, как и концентрации самой взвеси. По оценкам, в зоне река–море р. Мзымты осаждается на дно около 70% взвеси. Установлено, что из-за малых размеров зон смешения и короткого времени пребывания речного материала в этих зонах процессы его трансформации не успевают развиваться как в зонах смешения крупных рек [Гордеев и др., 2015].

Заключение

Попадая из реки в море, материковые воды образуют вблизи от устья мезомасштабные структуры, выделяющиеся пониженной соленостью и температурой, отличной от окружающей воды. Также, как правило, вода этих структур отличается

повышенной мутностью, высоким содержанием взвеси и растворенной органики. В современной литературе такие структуры часто называют «плюмами». Пространственные масштабы плюмов могут достигать десятков, а для крупных рек – и сотен километров, но при этом они сохраняют резко очерченную границу (шириной всего нескольких метров и даже нескольких сантиметров) от окружающих морских вод. Речные плюмы практически всегда приурочены к поверхности, так как образованы водой с пониженной плотностью. Но и по вертикали они могут охватывать более или менее значительный слой (до нескольких метров) в зависимости от мощности стока и интенсивности перемешивания. Во всех исследованных приустьевых районах характерный пространственный масштаб области опреснения составлял от 2 до 6 км. Наиболее значительная зона опреснения была отмечена возле устьев Мзымты и Туапсе. В речных плюмах наблюдалось усиление вертикальной плотностной стратификации. По этой причине в приустьевых зонах динамический отклик поверхностного слоя на атмосферный форсинг и ветровое вынуждение весьма энергичен. Возможно, именно с этим связано происхождение исходящих от района устья струйных течений и связанных с ними мезомасштабных структур, наблюдавшихся в условиях отгонного ветра.

В результате работ в том числе был прослежен отклик речного плюмажа на синоптические изменения ветрового режима и шельфовой циркуляции. Установлено, что даже относительно слабые ветры южных румбов в период межени способны эффективно «запирать» сток и даже приводить к обратному затоку морских вод в речные устья. Другим фактором, ограничивающим распространение речных вод на шельфе, оказывается интенсивная фоновая вдольбереговая циркуляция западного направления (вероятно, связанная с ситуациями в зоне хорошо развитого Основного Черноморского течения на континентальном склоне). В этих условиях плюм малой реки оказывается резко ограниченным по площади и принимает форму узкой полосы, прижатой к берегу и вытянутой в западном направлении. В условиях ветра северных румбов и слабо развитого вдольберегового течения речной плюм, по-видимому, сам по себе является одним из активных факторов шельфовой циркуляции, способствующих формированию субмезомасштабных антициклонических вихревых структур. В такой ситуации северная оконечность плюма может отрываться от побережья, а область влияния речного стока распространяться достаточно далеко в море (по результатам работ – до изобаты 40 м и далее). Характерное время приспособления плюмажа к изменению ветровых условий составляет от нескольких часов до суток.

Впервые были получены количественные характеристики распространения стока рек Мзымты и Кудепсты и переносимых ими загрязнений и огромной массы взвеси в прибрежной зоне, особенно в условиях весеннего половодья. Установлено, что пространственный охват области, существенно затронутой этими явлениями, составляет 3–11 км во вдольбереговом направлении и 1–3 км по направлению к глубокому морю. Максимальные концентрации растворенных органических ве-

ществ в этой зоне оказываются повышенными в 6, хлорофилла – в 9, а взвеси – в 70 раз. За период работ наблюдаемая площадь речного плюма менялась от 2 до 42 км², а максимальная аномалия солености в нем – от 0,8 до 3,5 епс. Площадь плюма увеличивается при росте вдольбереговой компоненты течения и напряжения трения ветра, направленных на северо-запад, что соответствует даунвеллинговым условиям.

Воздействие речного стока на гидрохимическую структуру вод, несмотря на небольшие размеры исследованных рек, прослеживается отчетливо. Отражение речного стока на химическом составе вод приустьевых районов моря зависит от индивидуальных особенностей состава химического стока отдельных рек. В приустьевых водах, как правило, повышено содержание фосфатов, кремния и различных форм минерального азота. Величина общей щелочности и содержание растворенного неорганического углерода могут быть как повышенными, так и пониженными. Результаты работ показали, что воды рек Ашамба, Вулан, Тешебс, Пшада и Мезыбь обогащены карбонатным углеродом по сравнению с морской водой, влияние речного стока хорошо прослеживается по увеличенным значениям общей щелочности, а реки района Туапсе и восточнее, вплоть до р. Сочи, содержали относительно немного карбонатного углерода, за исключением Кудепсты. Экстремально высокая щелочность вод р. Бытхи не была связана с повышенным содержанием карбонатного углерода. Содержание в воде растворенного неорганического углерода в первую очередь связано с геологическими особенностями бассейна водосбора (с выходами карбонатных пород), химическим составом подземного стока, морфологией русла реки. Следует учитывать, что химический состав стока меняется не только от реки к реке, но и сильно зависит от гидрометеорологических условий бассейна водосбора. При дождевых паводках, как правило, значительно растет содержание различных форм азота и фосфатов (скорее всего из-за смыва удобрений с полей), содержание кремния и карбонатного углерода, напротив, снижается.

Зона влияния химического выноса с материковым стоком хорошо отмечалась по увеличению общей щелочности, содержанию растворенного неорганического кремния и уменьшению величины рН. Поведение других гидрохимических параметров зависело от индивидуальных особенностей химического состава речной воды. Воздействие речного стока на гидрохимический режим прослеживалось на расстоянии от 0,5 до 3 км от устья в направлении преобладающего переноса вод. Сильно зависит состав речных вод и от фазы гидрологического режима. В условиях слабого стока в период осенней и зимней межени влияние стока остается значимым, однако количественные его характеристики (горизонтальные и вертикальные масштабы областей опреснения, величина понижения солености, концентрации связанных со стоком растворенных и взвешенных веществ) оказываются в 3–5 раз ниже, чем таковые для периода весеннего половодья.

Во всех приустьевых областях наблюдались выраженные максимумы биомассы фитопланктона (по хлорофиллу и оптическим показателям), многократно

превышающие фоновые значения, а также растворенных органических веществ и взвеси. В согласии с этим там отмечены также существенные особенности спектральных оптических свойств морской воды. Одна из важных черт приустьевых районов, обнаруженных в результате работ, это наличие области повышенной продуктивности (биологической активности), оконтуривающей устья практически всех изученных рек. Существование этих областей могло быть замечено только при использовании методов непрерывной регистрации химических параметров в проточной системе [Маккавеев, Завьялов, 2014]. При дискретном отборе проб на гидрологических станциях эти структуры просто не могли быть отмечены в силу небольшой своей ширины (первые десятки метров). Эти области с повышенной биологической активностью подпитываются принесенными реками биогенными элементами. Однако под влиянием динамических факторов (в данном случае нагона вод) эта область может исчезать на некоторое время.

Работы подтвердили, что при исследованиях подобного типа очень большое значение имеет дискретность наблюдений. При использовании традиционных подходов (работа на гидрологических станциях) многие характерные черты зоны взаимодействия морских и речных вод будут теряться или искажаться из-за высокой степени временной и пространственной изменчивости гидрологических и гидрохимических параметров. Особенно перспективным представляется использование проточных систем с непрерывной регистрацией измеряемых параметров. Это позволит проводить квазидномоментные съемки с нужным уровнем пространственной детализации.

Впервые (по крайней мере для Черного моря) удалось прямыми инструментальными измерениями проследить в течение нескольких последовательных суток динамику речного плюма и его изменчивость под воздействием гидрометеорологических факторов. В частности, показано, что площадные характеристики плюма увеличиваются с ростом вдольбереговой компоненты напряжения ветра в направлении на северо-запад, что соответствует даунвеллинговым условиям. Аналогичная зависимость отмечена и в отношении связи развития плюма с вдольбереговой компонентой скорости фонового течения. Значимой связи площади плюма и величины солёностной аномалии в нем с поперечной берегу компонентой напряжения ветра и скорости течения, а также завихренностью течений установить не удалось.

Показано, что большему площадному развитию плюма соответствует и более выраженная вертикальная стратификация в приповерхностном слое – поэтому можно заключить, что увеличение аномалии солёности приводит к увеличению площади плюма в большей степени, чем к его утолщению. Наконец, наблюдалась очевидная зависимость развития плюма от интенсивности речного стока, однако если мощность стока во время наблюдений менялась не более чем вдвое, то площадь плюма и аномалия солёнодержания в нем – более чем в 10 и 15 раз, соответственно. Таким образом, океанологические факторы, определяющие рас-

пространение плюма и вынос речных вод из прибрежной зоны, оказываются в данном случае более важными, чем интенсивность поступления речной воды в устье. Зона влияния речного стока всегда маркировалась максимальными концентрациями растворенной органики и хлорофилла. Концентрации последнего по полигону менялись от 0,2 до 2,2 мкг/л.

В методическом отношении эти работы еще раз подтвердили, что при измерениях подобного типа очень большое значение имеет дискретность наблюдений. При использовании традиционных подходов (работа на гидрологических станциях) многие характерные черты зоны взаимодействия морских и речных вод могут теряться или искажаться из-за большой временной и пространственной изменчивости гидрологических и гидрохимических параметров. Особенно перспективным представляется использование проточных систем с непрерывной регистрацией измеряемых параметров. Также оправдывает себя комплексный подход, сочетающий гидрофизические, гидрохимические, гидробиологические и гидрооптические методы исследования.