

## ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 551.464:574.2+574.4(268.4+268.5)

### ОСОБЕННОСТИ ГИДРОФИЗИЧЕСКОГО САМООЧИЩЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ ЧЕРНОГО МОРЯ БЛИЗ УСТЬЕВ РЕК

© 2008 г. **Н. А. Айбулатов, П. О. Завьялов, В. В. Пелевин**

*Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН*

Поступила в редакцию 27.06.2007 г.

В статье рассматриваются особенности гидрофизического самоочищения российского шельфа Черного моря близ устьев рек. Проведены синхронные зондирования термохалинной структуры моря, измерения скорости течений акустическим доплеровским зондом и измерения ультрафиолетовым флуоресцентным лидаром УФЛ-8 относительных концентраций растворенной органики, хлорофилла и взвеси. Данный комплекс измерений позволил оценить уровень гидрофизического самоочищения вод шельфа без отбора и проведения многочисленных трудоемких анализов проб воды.

Установлено, что струйные течения малых рек, впадающих в Черное море в пределах России, в меженьный период влияют на гидрофизическое самоочищение до глубины 20–30 м, в паводковый – могут влиять до бровки шельфа. Сделано предположение, что на Черноморском шельфе России поперечная компонента скорости, направленная в сторону континентального склона, обязана струйным течениям рек в период сильных паводков. Транзитивность тонкого осадочного материала и загрязняющих веществ на шельфе может возникать напротив устьев рек.

#### ВВЕДЕНИЕ

С южных склонов Северо-Западного Кавказа в Черное море стекает множество рек различной величины. В пределах России это короткие реки длиной менее 100 км и площадью водосбора не более 1000 км<sup>2</sup> [20]. У большинства рек эта площадь менее 500 км<sup>2</sup>; таких рек в Черноморской прибрежной зоне России около 50. Наиболее значимые из них – Пшада, Вулан, Туапсе и Сочи. Для них характерен среднемноголетний расход в пределах 10–15 м<sup>3</sup>/с. Особняком стоят более крупные Шахе (37 м<sup>3</sup>/с) и Мзымта (49 м<sup>3</sup>/с). Почти все реки обеспечиваются атмосферным питанием, которое поступает прямо или через подземный сток. Лишь самая крупная река региона Мзымта получает дополнительное питание от трех небольших ледников.

Особенности твердого стока рек региона во многом обусловлены выветриванием горных пород формации мела – палеогена [6]. В прибрежной волновой зоне отлагается галечник, на шельфе – илистый материал. Объемы твердого стока рек определялись Г.Н. Хмаладзе [20], Н.И. Кочетовым [10] и Ш. Джаошвили [7]. Разница в их цифрах связана с разными методами опробывания твердого стока. Однако можно смело констатировать, что крупные реки региона, число которых в 2 раза меньше, чем мелких, поставляют на шельф, по крайней мере, в 4 раза больше взвешенных и в 3 раза – влекомых наносов. Все крупные реки сосредоточены в юго-восточной части

кавказского побережья России. В этом же направлении растет и их взвесенесущая способность. Это хорошо подтверждает роль климата в формировании речного стока в море.

По условиям протекания российские реки Черного моря могут быть отнесены к горным с числами Фруда более 1.0; по видам питания они относятся к дождевым, по водному режиму – к паводочным, по степени устойчивости русла – к неустойчивым.

Около 80% стока большинства российских рек кавказского побережья приходится на зимне-весенний период. Общий среднемноголетний объем стока в Черное море с территории России составляет около 7 км<sup>3</sup>/год [7]. Вместе со стоком в море выносятся и загрязняющие вещества (ЗВ), которые находятся в форме взвеси и в растворенном виде. Их происхождение в речной воде этого региона связано, в частности, с дачным строительством по долинам рек и возрастающим использованием этих районов в рекреационных и сельскохозяйственных целях. Некоторые из малых рек, например Туапсе, подвержены и промышленным антропогенным воздействиям от находящейся в приустьевых областях портовой инфраструктуры.

Естественный гидрологический и гидрохимический режим Черноморской прибрежной зоны в настоящее время в значительной степени нарушен в результате хозяйственной деятельности на водосборе. В долинах рек нарушены правила и



нормы застройки территорий, ведется интенсивное строительство капитальных дачных сооружений в поймах рек, причем кроме опасности затопления это вызывает проблемы с утилизацией свалок строительного мусора и отсутствием очистных сооружений [2, 19]. Распространено строительство автозаправочных станций в устьях рек. Часто водозаборы находятся в непосредственной близости от АЗС. Во многих горных и предгорных населенных пунктах централизованные системы канализации с очистными сооружениями отсутствуют. Жидкие отходы собираются в септики, хлорируются и сбрасываются в реки и далее в море. Качество сточных вод превышает нормы ПДК на многих базах отдыха и пансионатах. Часто происходит затопление очистных сооружений в результате ливневых дождей и сброс неочищенных сточных вод в реки. Основные загрязняющие вещества – нефтяные продукты, тяжелые металлы, пестициды, бактериальное загрязнение.

Шельф в регионе имеет ширину 6–7 км, верхний (до 3 м) слой сложен алевроито-пелитовыми осадками с включениями ракушечного материала. Около берега развит грядовой бенч, берег сложен галечным материалом. Глубина шельфа в районе его бровки составляет около 60–70 м.

Исследование механизмов естественного самоочищения шельфовых вод от загрязнения, в том числе и под воздействием речных струй, относится к актуальным фундаментальным и прикладным проблемам океанологии.

Термин “самоочищение” в литературе трактуется неоднозначно. Одни [4, 5] под самоочищением морской среды от загрязнений понимают совокупность всех природных процессов, обуславливающих распад, превращение, трансформацию и утилизацию загрязняющих веществ, приводящих к восстановлению первоначальных свойств и состава морской среды, либо до состояния, свойственного незагрязненному водоему до некоторого регламентированного уровня. Другие согласно ГОСТ-27065-86 под самоочищением вод понимают совокупность природных процессов, направленных на восстановление благополучия водного объекта. Последнее определение, на наш взгляд, не конкретно, размыто.

Самоочищение шельфовой зоны моря, и в частности, Черного, происходит не только под влиянием разбавления, но и в результате циркуляции течений, волнения, каскадинга, биохимического окисления органических веществ сточных вод. Поступающие по рекам загрязняющие вещества в устьевых частях рек могут попадать в так называемый маргинальный фильтр [11]. К этому можно добавить и влияние сорбционной способности грунтов шельфа.

В данной статье мы рассмотрим особенности гидрофизического самоочищения прибрежной зоны российской части Черного моря под влиянием стоков рек. Влияние материковых стоков на прибрежные воды не сводится только к эффектам, связанным с непосредственной “алгебраической” реакцией термохалинных полей на перемешивание речных вод. Еще более существенно то, что освоение этих вод приводит к перестройке вертикальной плотностной стратификации и, как следствие, процессов турбулентного обмена в целом. В результате локальное опреснение верхнего слоя моря речным стоком часто влечет за собой значительные изменения баланса тепла, завихренности в большом пространственном масштабе. Через речные факелы (плюмажи) и связанные с ними мезомасштабные циркуляционные структуры может осуществляться один из механизмов кросс-шельфового переноса.

Параллельно с этой задачей мы изучали возможность транзита осадочного материала на участке “континент – шельф – материковый склон” под воздействием речных струй, что вносит значимый вклад в осадкообразование на шельфе и материковом склоне [1]. Кроме того, решение этого вопроса имеет и чисто прикладное значение.

Летом 2006 г. для решения этих задач были предприняты специализированные экспедиционные исследования в приустьевых областях рек Мезыбь, Пшада, Вулан и Ашамба. Проведенные измерения можно рассматривать как “пилотные” и имеющие целью не только получение данных, но также и отработку методик для реализации в дальнейшем подобных наблюдений с более широким временным и пространственным охватом рек российского Черноморского побережья.

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МЕТОДЫ

Натурные исследования проводились с борта катера “Ашамба” в период с 1 по 9 июня 2006 г. Зондирования термохалинной структуры, измерения скорости течений акустическим доплеровским зондом и измерения ультрафиолетовым флуоресцентным лидаром УФЛ-8 выполнялись на трех полигонах в приустьевых районах рек Пшада, Вулан и Мезыбь. Кроме того, с помощью лидара была обследована приустьевая зона реки Ашамба (Голубая бухта), в период значительного ливневого паводка. Перед началом измерений на каждом из полигонов проводилась рекогносцировка реки вблизи устья с целью определения характера стока. Расположение станций на взморье выбиралось сообразно вероятным размерам речного плюмажа таким образом, чтобы, по возможности, охватить как зону опреснения, так и “невозмущенную” область.



Задачей лидарного зондирования являлось исследование мелкомасштабной пространственной изменчивости концентрации растворенных органических веществ, хлорофилла и взвеси на выбранных полигонах вблизи устьев рек и связи этих характеристик с гидрологическими параметрами. В отличие от зондирований термохалинной структуры и измерений скорости течений, лидарные измерения выполнялись не только на станциях, но и на ходу судна.

#### *Ультрафиолетовый флуоресцентный лидар УФЛ-8*

Ультрафиолетовый флуоресцентный судовый автоматический лидар УФЛ-8 разработан в лаборатории исследования океана аэрокосмическими средствами Института океанологии РАН под руководством проф. В.Н. Пелевина. Эффективность прибора доказана при исследованиях вод Атлантики, Черного и Балтийского морей в ряде экспедиций на научно-исследовательских судах Института океанологии РАН [22, 24].

Лидар УФЛ-8 предназначен для экспрессных определений концентрации в морской воде растворенных и взвешенных органических веществ, хлорофилла фитопланктона, оценки общей концентрации взвешенного вещества, а также для обнаружения на морской поверхности и в приповерхностном слое загрязняющих органических веществ, в частности нефтепродуктов.

УФЛ-8 позволяет производить лазерное зондирование поверхности моря и регистрацию флуоресценции в автоматическом режиме; он полностью управляется из лаборатории с портативного компьютера, работает в непрерывном автоматическом режиме по заданной программе измерений, с частотой следования лазерных импульсов 2 Гц. Количество оптических каналов приемника – 2, спектральных каналов в двух турелях со сменными светофильтрами – 11. При работе в режиме непрерывного разреза на ходу судна можно контролировать одновременно до 3-х параметров – изменчивость концентраций растворенного органического вещества (РОВ), хлорофилла фитопланктона и взвеси. Максимальное линейное разрешение на поверхности моря при работе в режиме обнаружения (оконтуривания) органического загрязнения (например, поиск нефтяной пленки или источника сброса неочищенных вод) или в режиме определения речного плюмажа, зависит от скорости судна. Применительно к океанским судам с крейсерской скоростью 10 узлов – расстояние между точками зондирования около 3 м, для маломерных судов со скоростью хода 2–3 узла соответственно около 1 м и менее.

У лидара УФЛ-8 герметичный корпус, что позволяет не обслуживать его в ходе рейса и прово-

дить измерения практически при любых погодных условиях. Мощностные характеристики лазера, чувствительность приемного тракта и специально разработанные алгоритмы выделения флуоресцентного отклика среды на фоне шума позволяют получать уверенный сигнал флуоресценции при работе с высоты до 20 м и условиях дневной солнечной засветки при самых низких концентрациях флуорентов в открытых океанских водах.

Основные параметры лидара: длина волны лазера – 354 и 532 нм; частота зондирования – 2 Гц; энергия ультрафиолетового импульса – 2 мДж; длительность зондирующего импульса – 10 нс; входная апертура приемника – 140 мм; рабочий диапазон дальностей – 2–30 м; количество спектральных каналов – 11, из которых 8 измерительных и 3 опорных; вес прибора – 35 кг; электропитание – от бортовой сети 220 В, либо автономное 12 В.

Принцип действия: лидар размещается на борту судна; зондирующий луч направляется на поверхность воды под углом 20–60° к вертикали. Вошедший в воду ультрафиолетовый лазерный импульс вызывает флуоресценцию органических веществ, растворенных в толще воды либо находящихся на поверхности, а также комбинационное (рамановское) рассеяние непосредственно водой. Флуоресцентное свечение в спектральном диапазоне 350–700 нм принимается и анализируется спектроанализирующим блоком лидара. Уровень принятых сигналов флуоресценции, зависящий от концентрации РОВ, хлорофилла, а также от сигнала комбинационного рассеяния (КР) воды и упругого рассеяния ультрафиолета регистрируются, запоминаются и анализируются портативным компьютером. Полученный спектр сигналов называется флуорограммой моря. При зондировании открытых черноморских вод лидаром УФЛ-8 значимая глубина проникновения лазерного излучения, относительно вклада в принимаемую лидаром флуоресценцию, по нашим оценкам составляет 2–4 м для РОВ и 1–2 м для хлорофилла.

Разработанная методика позволяет по флуорограмме моря рассчитать относительную концентрацию РОВ, хлорофилла фитопланктона и взвеси, содержащихся в верхнем слое моря, оценить значения оптического индекса типа вод для данной акватории [13, 14, 15]. В настоящее время ведутся работы по усовершенствованию методики обработки полученных данных с целью получения значений концентраций в абсолютных (весовых) величинах.

В статье мы рассмотрим лишь данные, полученные нами в указанном районе российского Черноморского побережья вблизи некоторых устьев малых рек при измерениях интегрального



содержания взвеси, включая как органические, так и неорганические составляющие взвешенного вещества, находящегося в приповерхностном слое. В зависимости от чистоты вод толщина приповерхностного зондируемого лазером слоя, вносящего 90% вклада в принимаемый лидаром сигнал упругого рассеяния на взвеси, составляет от нескольких сантиметров для самых замутненных портовых или речных вод и до приблизительно 5 м для чистых морских или океанских вод.

Приведем необходимые формулы для расчета концентрации взвешенного вещества.

Зондирование моря производится лазерным импульсом энергии  $N_0$ , с длиной волны 354 нм в направлении, близком к вертикали. На глубину  $z$  приходит энергия, равная

$$N = N_0 \exp(-\alpha_{354} z),$$

где  $\alpha_{354}$  – показатель вертикального ослабления потока солнечного излучения в море. В некоторых зарубежных работах для этого показателя используется также обозначение  $K_{d354}$ .

Несмотря на то, что зондирование производится узким световым пучком, следует использовать показатель вертикального ослабления  $\alpha_{354}$ , определенный для широкого пучка солнечного света [16]. Это объясняется тем, что мы учитываем энергию импульса, достигшего горизонта  $z$ , невзирая на размытие пучка в направлении, поперечном к оси пучка. Все фотоны исходящего импульса, достигшие глубины  $z$ , участвуют в формировании сигнала обратного рассеяния, сигнала флуоресценции и т.д., а следовательно, должны приниматься в расчет. Поэтому при учете ослабления света по вертикали следует использовать именно показатель вертикального ослабления  $\alpha_{\lambda}$ , введенный для потока солнечного излучения.

Слой воды толщиной  $dz$  рассеивает назад излучение с энергией, равной

$$dN_{354} = N_0 \exp(-\alpha_{354} z) \beta_{354} dz,$$

где  $\beta_{354}$  – показатель рассеяния назад элементарным объемом воды при  $\lambda = 354$  нм.

Энергия, рассеянная элементарным слоем и дошедшая до поверхности, равна

$$dN_{354} = N_0 \exp(-2\alpha_{354} z) \beta_{354} dz.$$

Полная энергия, рассеянная морской средой (для диапазона глубин от нуля до бесконечности) в направлении, обратном лазерному лучу, составляет (после интегрирования по  $z$ ):

$$N_{354} = N_0 \beta_{354} / (2\alpha_{354}).$$

Часть энергии, попавшая в фотоприемник, учитывается введением множителя  $G$

$$N_{354} = N_0 \beta_{354} G / (2\alpha_{354}),$$

где  $G$  – “геометрический” фактор, зависящий от высоты лидара над поверхностью, угла наклона оси лазера к горизонту, угла входа луча под поверхность воды, зависящего от наклона самой поверхности моря в точке входа луча и от входной апертуры приемника.

По аналогии можно написать, что энергия импульса комбинационного рассеяния, дошедшая до приемника  $N_{кр}$  на длине волны 404 нм, равна следующему выражению:

$$N_{кр} = N_0 \gamma_{кр} G / (\alpha_{404} + \alpha_{354}),$$

где  $\gamma_{кр}$  – константа, определяемая комбинационным рассеянием непосредственно водой.

Оценка концентрации  $B_{взв}$  содержащихся в воде рассеивающих веществ может быть проведена на основе лидарных измерений следующим образом. Как следует из приведенных выше формул для  $N_{354}$  и  $N_{кр}$ , частное от их деления друг на друга равно  $\beta_{354} / \gamma_{кр}$  (учитывая, что  $2\alpha_{354} \cong (\alpha_{354} + \alpha_{405})$ ). Отсюда следует расчетная формула

$$\beta_{354} = k N_{354} / N_{кр},$$

где  $k$  – градуировочный коэффициент.

Концентрация взвеси считается пропорциональной  $\beta_{354}$ , т.е. показателю обратного рассеяния среды на этой длине волны, за вычетом обратного рассеяния, создаваемого “абсолютно чистой” морской водой.

Концентрация взвеси  $B_{взв}$  оценивается как разность между измеренным показателем рассеяния назад  $b_{354}$  для среды в целом и показателем рассеяния назад непосредственно водой (т.е. релеевским рассеянием на флуктуациях Смолуховско-Эйнштейна). Оценить величину  $b_{354}$  непосредственно воды мы попробовали по совокупности  $b_{354}$ , взятой для чистых океанских вод. По большому массиву измерений в самых чистых океанских водах  $b_{354}$  изменялась от 12 до 15. Поэтому для значений концентрации взвеси  $B_{взв}$  в относительных единицах нами предложена формула

$$B_{взв} = b_{354} - 12,$$

где  $b_{354}$  ( $b_{354}$  тождественно  $\beta_{354}$ ) определяется по флуорограмме, как указано выше.

Из приведенного выше следует, что по результатам работ 2006 г. мы имеем распределение концентрации взвеси на полигонах в относительных единицах. В дальнейший план работ входит отбор проб воды синхронно с лидарными измерениями и определение спектров поглощения компонентами взвеси. Лидарные измерения взвеси будут приведены к оптическим единицам светопоглощения [ $M^{-1}$ ].



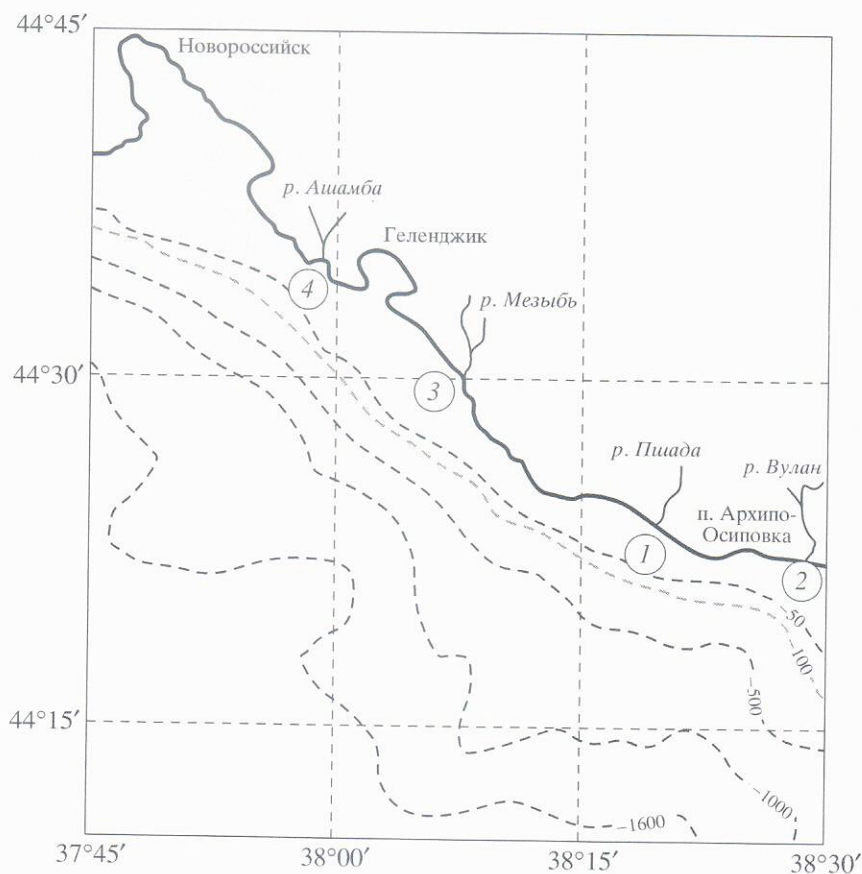


Рис. 1. Схема района работ и расположения полигонов измерений океанологических характеристик: 1, 2, 3, 4 – полигоны работ вблизи устьев рек Пшада, Вулан, Мезыбь и Ашамба соответственно; пунктирные линии – изобаты.

#### *Зондирования термохалинной структуры и измерения скорости течений*

Зондирование термохалинной структуры прибрежных вод выполнялось стандартным методом с помощью CTD зонда SBE19plus. После погружения он стабилизировался на горизонте в течение 1 мин. Принимались во внимание только данные, полученные на спуске прибора. Кроме того, не рассматривались данные, относящиеся к уровням глубины менее 1 м. Измерения скорости течений выполнялись на станциях акустическим доплеровским профилографом ADP SonTec, передатчик которого крепился на глубине 0.5 м на специальном кронштейне, вынесенном на 1 м от борта судна. Приведение данных к неподвижной системе отсчета осуществлялось с помощью функции “bottom tracking”, которая позволяет по отраженному сигналу от дна рассчитать и вычесть скорость дрейфа самого судна. Значения компонентов скорости течений в 2.5-метровых интервалах глубины на каждой из станций усреднялись за период 2–5 мин. Эти значения затем приводились на более частую горизонтальную сетку посредством схемы объективной интерпо-

ляции [23]. Схема района работ и расположение полигонов измерений даны на рис. 1.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Скорости течений у устьев кавказских рек России.** Течения в шельфовой зоне северо-восточной части Черного моря изучались в конце прошлого века [18, 21].

Взаимодействие вод реки и моря при их непосредственном контакте приводит, как известно, к замедлению струйного течения и, как следствие, – к отложению речных наносов и формированию специфических устьевых форм рельефа [12].

Чем больше скорость течения и чем ближе точка наблюдений к устьевому створу, тем круче график падения скорости. Сравнение результатов расчета с данными наблюдений в устьях рек затрудняется следующими обстоятельствами: данных наблюдений за скоростями течений близ устьев мало, большинство наблюдений относятся лишь к скоростям по отдельным продольным разрезам вдоль струи, часто не совпадающим с ее



осью. Почти отсутствуют данные по течениям в периоды сильных наводнений в реках и сильных штормов, которые могут и не совпадать с зимне-весенним паводком.

Анализ литературных данных наблюдений, представленных в виде безразмерных графиков зависимостей, показывает, что струи в устьях различных рек подобны; имеющиеся некоторые различия в характере изменения скоростей в разных устьях могут быть объяснены местными условиями.

Расчеты и лабораторные опыты [12] показали, что чем больше уклон верхней части шельфа, тем меньше ширина транзитной струи, тем быстрее убывает вдоль потока скорость течения. При увеличении глубины транзитная часть струи сжимается. Как показали опыты В.Н. Михайлова, распределение скоростей течений вдоль потока закономерно изменяется по ширине струи. Вблизи устьевого створа эпюра средних на вертикалях скоростей почти такая же, как в русле. Дальше от устьевого створа эпюра скоростей расплывается и приближается по форме к кривой распределения вероятностей Гаусса.

Распределение скоростей течения в речной струе неоднозначно. Если глубина на взморье невелика, то струя, не отрываясь от дна, продолжает, постепенно затухая, двигаться в сторону моря (так называемый отмелый тип взморья). В этом случае эпюры распределения скоростей по вертикали близки к обычным речным и могут быть выражены уравнениями параболы, логарифмики, эллипса и т.п.

В тех случаях, когда глубина резко увеличивается или речная струя втекает в водоем с плотной морской водой, как правило, происходит отрыв струи от дна (приглубый тип взморья). Именно этот случай и представляет наибольший интерес, так как при нем существенно изменяется режим движения наносов. Часто внизу струи возникает подсос морских вод, увеличивающий толщину струи вследствие подтока новых масс воды. Эпюра вертикального распределения скоростей приобретает вытянутый, часто S-образный вид [17].

Выходящая на взморье речная струя, как правило, на некотором расстоянии перестает быть симметричной и поворачивает в направлении морского вдольберегового течения. Выяснение закономерностей такого изгиба речной струи на взморье имеет большое значение для оценки уровня транзита осадочного материала в зоне "континент – шельф – материковый склон".

Во время волнений к скоростям речных струй прибавляются скорости компенсационных течений в виде "разрывных", и это может усиливать интегральные скорости течений в сторону моря. Надо сказать, что последние могут достигать больших скоростей. Так, например, в августе

1951 г. в Голубой бухте (Рыбацкой) во время 8-балльного шторма с пляжа близ устья р. Ашамба на глубину 7.0 м был вынесен бетонный сегмент весом 200 кг.

Переходя к анализу течений близ устьев российских кавказских рек Мезыбь, Пшада, Вулан, уточним, что приемный бассейн (шельф Черного моря) по морфологии относится к приглубым, приустьевые береговые формы рельефа (косы, бары и т.п.) здесь сложены галькой и гравийно-галечным материалом [9]. Полигоны, где измерялись течения, показаны на рис. 1, точки измерений – на рис. 2.

*Приустьевая область реки Пшада.* По данным ADP зондирования северо-западнее устья находилась область антициклонической завихренности с преобладанием сильного (до 50 см/с) течения в юго-восточном направлении. На юго-востоке располагалась циклоническая структура с более слабым течением, направленным на юго-запад. Напротив устья обе структуры образуют зону конвергенции, вдоль линии которой наблюдалось слабое струйное течение в направлении от берега (см. рис. 2а). Влияние стока реки прослеживается в виде хорошо выраженной зоны опреснения непосредственно у устья. Характерное понижение солёности составляет здесь 0.15–0.20‰ по отношению к "фоновым" значениям, измеренным за пределами этой зоны. Опресненный приустьевой сектор р. Пшада имел характерный горизонтальный масштаб порядка 2 км. Можно предположить, что в периоды пиковых значений речного стока этот масштаб оказывается в несколько раз больше, т.е. при местной ширине шельфа (6 км) сток может достигать материкового склона.

*Приустьевая область реки Вулан* осложнена еще и устьем небольшой речки Тешебс, которая впадает в море в юго-восточной оконечности бухты на расстоянии 1 км от устья р. Вулан. Поле скоростей течений вблизи устья р. Вулан по данным ADP зондирования напоминает приустьевую область р. Пшада. Следует отметить, что измерения течений здесь также выполнялись при сгонных северо-восточных ветрах (скорость ветра немногим более 10 м/с). В северо-западной части района наблюдалась антициклоническая завихренность, а в юго-восточной – циклоническая структура. В области конвергенции этих двух вихрей, находящейся напротив устья р. Вулан, отмечено струйное течение по нормали от берега со скоростью до 40 см/с (см. рис. 2б).

Область опреснения моря речными водами рек Вулан и Тешебс смещена к северо-западу по отношению к оси бухты и, по-видимому, больше связана со стоком р. Вулан. Понижение солёности в поверхностном слое 1.0 м составляет здесь до 0.3‰ относительно фоновых значений (в каче-



стве фоновых мы считаем значения этого параметра вне зоны распространения речного плюмажа). Характерные размеры факела Вулана составляют более 2 км от устья реки. В отличие от р. Пшада след стока р. Вулан отчетливо прослеживается и в изменениях температуры поверхностного слоя моря, которая в факеле оказывается ниже на 0.5–1.0°C.

Влияние стока р. Вулан на воды шельфа отчетливо проявляется и в распределении концентрации хлорофилла фитопланктона. Как и опресненная область, зона повышенного содержания хлорофилла смещена по отношению к оси бухты и занимает площадь свыше 2 км<sup>2</sup>. Концентрация хлорофилла здесь в 1.5–2.0 раза выше фоновых значений.

**Приустьевая область реки Мезыбь.** На момент нашей съемки местные власти п. Дивноморское полностью перекрыли устье реки при помощи бульдозеров для прохода отдыхающих, в результате чего поверхностный сток был сведен практически к нулю, сохранился лишь подземный сток. По данным ADP зондирования, поле течений в приустьевой зоне р. Мезыбь имело антициклоническую форму при масштабе вихря 1 км. При этом вблизи берега течение было направлено на юго-восток с характерным значением скорости 10–20 см/с. Размеры области опреснения в море составляли 200–500 м (снижение солёности в ней всего около 0.03‰ по отношению к “фону”) и оказались значительно меньше, чем в случаях с реками Пшада и Вулан. Факел вытянут вдоль берега на юго-восток (см. рис. 2в), что соответствует характеру локальной циркуляции.

**Распределение взвеси в приустьевых областях российских кавказских рек.** В северо-восточной части Черного моря в пределах России в море поступает 930 тыс. м<sup>3</sup> речных наносов. Часть из них (крупная) остается близ берега или на берегу, а тонкая – уносится в открытую часть моря и медленно осаждается на дне, участвуя в современном процессе осадкообразования на шельфе [7]. Самое большое количество наносов в море выносят реки Шапсухо, Туапсе, Псезуапсе и Мзымта. Самая крупная река региона – Мзымта, в море выносит 158 тыс. м<sup>3</sup> наносов, из них 60.0 – береговые, 98.0 – морские [7]. В целом из-за антропогенных нарушений абсолютное количество речных наносов уменьшено не очень сильно. Несмотря на то, что протяженность устьевых участков невелика (по Мировому океану – 14.6%), роль речных взвесей в формировании потоков взвеси на шельфе остается решающей [1].

Второй источник взвеси – абразия береговых обрывов (до 0.3–0.5 м/год) и истирание галечного пляжевого материала (до 11%/год).

Содержание в воде взвеси, которая не успевает осесть вблизи устья, где начинается умень-

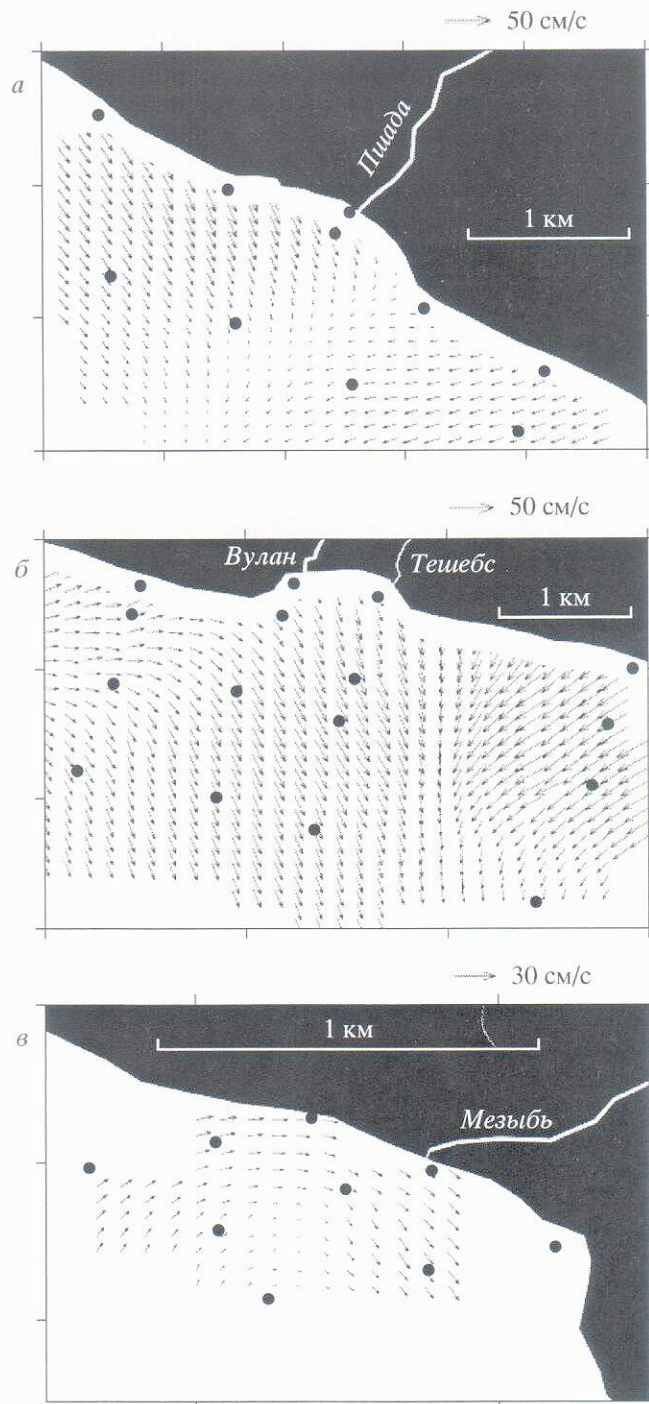


Рис. 2. Течения в поверхностном слое моря близ устьев рек. Стрелками обозначены их направления. Точками обозначены станции измерений. Вблизи а – р. Пшада; б – р. Вулан; в – р. Мезыбь.

шение скоростей течений в инерционной струе, может изменяться вдоль струи только вследствие перемешивания морских и речных вод [12].

Характер изменения концентрации взвеси и скорости течений в струе совпадают. Данные наблюдений близ устьев Волги, Кубани, Куры пока-



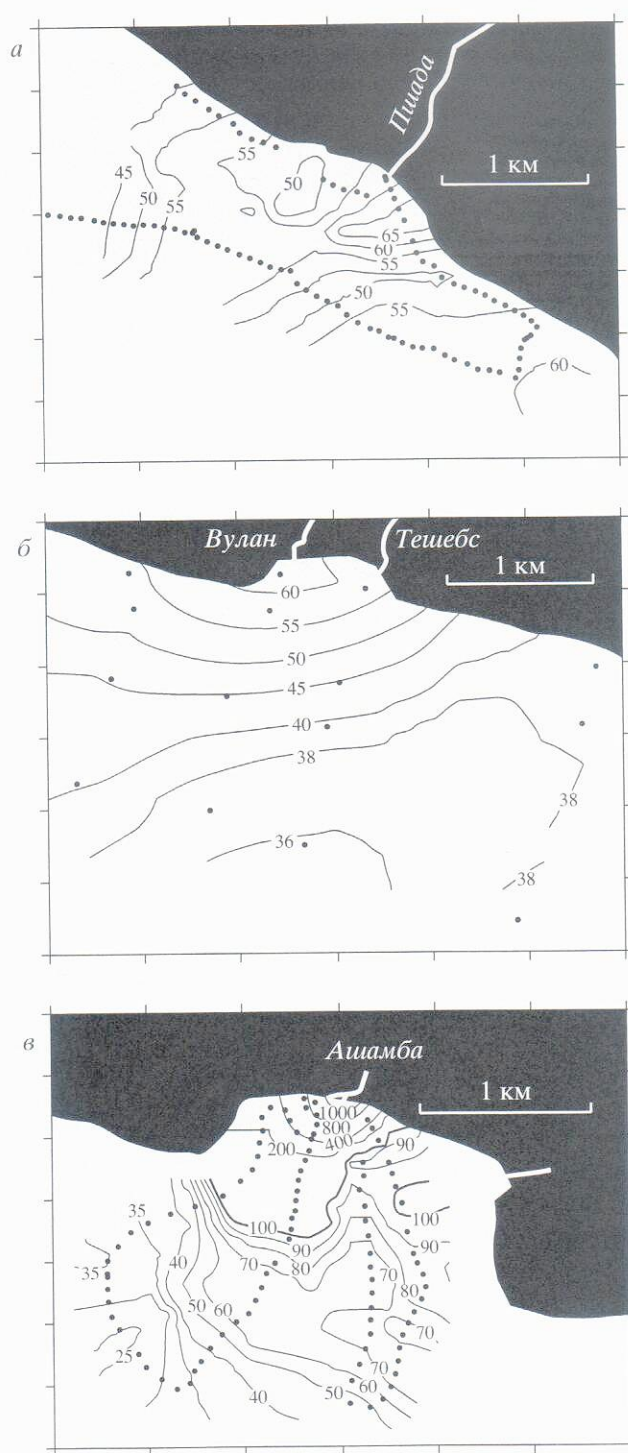


Рис. 3. Распределение концентрации взвеси в море близ устьев рек (в усл. ед.). Точками обозначены станции измерений. Вблизи а – р. Пшада; б – р. Вулан; в – р. Ашамба.

зывают, что действительно концентрация взвешенных наносов изменяется вдоль струи точно так же, как и скорость в ней.

Уменьшение содержания взвеси (в мг/л) вдоль струи, происходящее с той же интенсивностью,

что и уменьшение скорости течения, является таким образом следствием разбавления речной воды морской. Классиками речной гидрологии было показано, что в зоне смешения морских и речных вод за счет процессов флокуляции и коагуляции растворенных (коллоидных) и взвешенных частиц происходит осаждение основной части твердого стока рек. Это было подтверждено и А.П. Лисициным [11] на примере Енисея, Лены и Оби. Он кроме этого показал, что в зоне смешения морских и пресных вод сочетаются: а) механическое осаждение загрязняющих веществ вместе со взвесью; б) сорбция; в) соосаждение со свежесформованными оксигидратами железа; г) биоассимиляция.

Проанализируем результаты по распределению взвеси на взморье при впадении малых горных рек Ашамба, Пшада и Вулан.

На рис. 3 дано площадное распространение взвеси вблизи рек Пшада, Вулан и Ашамба (в Голубой бухте), точками обозначены места лидарных зондирований. Для Пшады и Вулана относительные концентрации взвеси в приустьевой зоне близки по своим значениям, в то же время в приустьевой зоне Ашамбы уровень концентраций взвеси выше более чем на порядок. Это объясняется тем, что измерения в районе Ашамбы выполнены после дождевого паводка, в районе Пшады и Вулана – в относительно спокойных условиях.

Максимальная концентрация взвеси вблизи р. Ашамба (в относительных единицах) приурочена к участку взморья вблизи устья реки на расстоянии от устья до 50 м (отн. ед. 1000, пиковые значения – до 2200). Основной факел взвеси (до отн. ед. 400) представляет собой сектор, на морской периферии которого глубина моря составляет около 25 м. Далее идет поле взвеси с относительными значениями 200–100 ед., которое заканчивается глубинами 40 м. Также можно различить сток ручья, впадающего в восточную часть бухты, что объясняется условиями сильного дождевого паводка. На выходе из Голубой (Рыбацкой) бухты поле взвеси расширяется в обе стороны от осевого створа бухты; концентрация взвеси в относительных величинах здесь равна 100–25 и уменьшается в сторону открытого моря. Расстояние изобаты 25 м от берега составляет 2000 м, там уже господствуют дрейфовые шельфовые течения, которые подхватывают речную взвесь и несут ее на северо-запад.

Экспериментальные данные, полученные ранее в придонном слое (40 см от дна), показывают, что на глубинах 10, 15, 20 и 25 м взвесеуловители длительного действия (сосуды диаметром 10 см и высотой 30 см, закрытые воронкой с отверстием 10 мм) в течение осенне-зимне-весеннего сезона оказались наполнены осадочным материа-



лом. На глубинах 10 и 15 м толщина слоя отложившегося взвешенного материала составила 25 см (в мокром состоянии), причем по механическому составу он мало чем отличался от донного для указанных глубин. На глубинах 20 и 25 м толщина слоя взвесей составила соответственно 13 и 7.5 см [3], материал в этих взвеснакопителях тоньше донного; очевидно, что этот материал принесен сюда во взвешенном состоянии извне, т.е. возможно из реки.

Ширина шельфа по траверсу Голубой бухты составляет 6 км. По распространению взвеси, скоростям в речной струе на взморье в половодье, по гидрохимическим показателям речной поток Ашамбы при максимуме стока может пересекать неширокий шельф в данном месте и поставлять осадочный тонкий материал на его бровку. Подводные наблюдения из автономного обитаемого аппарата "Аргус" [3] показывают, что в районе бровки шельфа происходит накопление тонкого осадочного материала. Однако верхняя часть материкового склона в этом месте почти лишена рыхлого осадочного материала.

В районе устьевой части р. Пшада (см. рис 3а) основной факел распространения взвеси также прижат к устью реки с небольшим сдвигом на юго-восток с относительной концентрацией 70–60 ед. и распространяется от берега на 1000 м. Далее уменьшение концентрации взвеси в сторону моря идет сравнительно медленно (от 60 до 40).

Измерения концентрации взвеси в устьевой части р. Вулан показали, что максимальное значение этой величины приурочено к самому устью (65–55 отн. ед.), факел взвеси прижат к северо-западному борту бухты. Поле его значительных концентраций распространяется в море на 650 м. Далее расположено поле взвеси с относительной концентрацией 55–47, которое имеет ширину 1150 м. И, наконец, идет поле концентрации взвеси около 40 (1850 м от берега).

Выполненные ранее [1] работы по измерению распределения взвеси (в абсолютных величинах) показали, что в штилевую погоду и во внепаводочный период поле взвеси за зоной возможного влияния рек (0.5–0.75 мг/л) начинается в 2–3 км от берега. В паводочный период, который может быть приурочен не только к июню месяцу (может быть и в феврале), мы склонны думать, что речные струи вместе с факелом взвеси и загрязняющими веществами могут пересекать такой узкий шельф (6 км) и выносить взвесь, а вместе с ней и загрязнения на материковый склон.

Известно, что на шельфе по траверсу р. Ашамба нормальная к берегу компонента скорости течений по повторяемости на порядок меньше, чем у течений вдоль берегового направления [1]. Она вполне может быть связана со струйным речным течением, возникающим в бурный паводковый

период. Известно, например, что даже на широком Бразильском шельфе на фоне преобладающего вдольберегового течения возникают поперечные к берегу течения (вдольбереговые втрое превышают поперечные). Нормальная компонента скорости определяется, возможно, неустойчивостью и меандрированием стокового течения. С ветром она не коррелирует [8].

По-видимому, транзитивность осадочного материала на шельфе может возникнуть напротив устьев рек. Однако различного рода загрязняющие вещества, выносимые реками, накапливаются в основном в пределах шельфа (кроме растворимых).

Насколько типична полученная нами картина течений и распределения взвеси для данного района исследований? Течения и взвесь близ устьев рек измерялись при сгонных ветрах, что очень типично для данного района. Зафиксированные течения при исследовании также весьма типичны. Известно [1], что генеральная циркуляция вод в Черном море характеризуется циклоническим движением. Его главным структурным элементом является Кольцевое циклоническое течение (КЦТ). Вследствие синоптической изменчивости ветра, гидродинамической неустойчивости и взаимодействия с рельефом шельфа КЦТ испытывает волнообразные колебания: его стержень отклоняется то вправо, то влево, т.е. это течение меандрирует. Направление течений в основном имеет северо-западную составляющую.

## ВЫВОДЫ

1. Синхронное STD зондирование термохалинной структуры, измерение скорости течений акустическим доплеровским зондом (ADP) и измерение ультрафиолетовым флуоресцентным лидаром УФЛ-8 относительных концентраций РОВ, хлорофилла и взвеси дают возможность получить данные, позволяющие оценить уровень гидрофизического самоочищения прибрежной зоны приемного водоема без отбора и проведения многочисленных трудоемких химических анализов вод.

2. Струйные течения малых рек, впадающих в Черное море в пределах России, в меженный период согласно измерениям влияют на гидрофизическое самоочищение до глубины 20–30 м, в паводковый – могут влиять до бровки шельфа.

3. Зарегистрированная в Черноморской прибрежной зоне России поперечная компонента скорости движения вод, направленная в сторону континентального склона, возможно, обязана струйным течениям рек в период сильных паводков.

4. Транзитивность тонкого осадочного материала и загрязняющих веществ на Черноморском



шельфе России может возникать напротив устьев рек в паводковый период.

5. В дальнейших исследованиях необходимо распространить измерения до бровки шельфа и привести данные ультрафиолетового флуоресцентного лидара УФЛ-8 к абсолютным весовым единицам (мг/л).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 05-05-65159) и Отделения наук о Земле Российской академии наук.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айбулатов Н.А. Динамика твердого вещества в шельфовой зоне. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 304 с.
2. Айбулатов Н.А. Деятельность России в прибрежной зоне моря и проблемы экологии. М.: Наука, 2005. 364 с.
3. Айбулатов Н.А. Вижу дно: к истории подводных исследований в России. М.: Наука, 2006. 172 с.
4. Айзатулин Т.А., Лебедев В.Л. Океан: фронты, дисперсии, жизнь. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 192 с.
5. Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР, 1960. 329 с.
6. Геоэкология шельфа и берегов России / Под ред. Н.А. Айбулатова. М.: Ноосфера, 2001. 428 с.
7. Джаошвили Ш. Реки Черного Моря. Тбилиси, 2003. 186 с.
8. Завьялов П.О. Широкий шельф под влиянием пресноводного стока. Автореф. дис. ... докт. географ. наук. М.: ИОАН, 2000. 20 с.
9. Зенкович В.П. Морфология и динамика советских берегов Черного моря. Т. 1. М.: Изд. АН СССР, 1958. 187 с.
10. Кочетов Н.И. Речные наносы и пляжеобразование на северо-востоке Черноморского побережья Кавказа. // Океанология. 1991. Т. 31. Вып. 2. С. 296–300.
11. Лисицин А.П. Маргинальный фильтр океанов. // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 135–147.
12. Михайлов В.Н. Динамика потока и русла в неприливых устьях рек. М.: Гидрометеиздат, 1971. 260 с.
13. Пелевин В.Н., Абрамов О.И., Карлсен Г.Г., Пелевин В.В., Стогов А.М., Хлебников Д.В. Лазерное зондирование поверхностных вод Атлантики и морей, омывающих Европу // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14. № 8. С. 704–709.
14. Пелевин В.Н., Абрамов О.И., Карлсен Г.Г. Подспутниковый эксперимент в Средиземном море: сравнительные исследования загрязненности вод морей, омывающих Европу, средствами лазерного зондирования с борта судна // Инженерная экология. 1995. № 6. С. 31–41.
15. Пелевин В.Н., Рутковская В.А. Об оптической классификации океанских вод по спектральному ослаблению солнечного излучения // Океанология. 1977. Т. 27. Вып. 1. С. 50–54.
16. Пелевин В.Н., Рутковская В.А. Об ослаблении фотосинтетически активной солнечной радиации в водах Тихого океана // Океанология. 1978. Т. 18. Вып. 4. С. 619–626.
17. Симонов А.И. Гидрология устьевой области Кубани. М.: Гидрометеиздат, 1958. 140 с.
18. Титов В.Б. О распределении скорости поверхностного течения в районе северо-кавказского побережья // Океанология. 1985. Т. 25. Вып. 3. С. 408–413.
19. Федорова С.И., Тамов М.А., Руднянская Н.В., Пинигина В.В. Современное состояние горных рек южного склона Кавказского хребта (Краснодарский край) // Докл. и сообщ. 22-го пленарного межвуз. координац. совещ. по проблемам эрозионных, русловых и устьевых процессов. Новочеркасск: Изд-во МГУ, 2007. С. 37–48.
20. Хмаладзе Г.Н. Выносы наносов реками Черноморского побережья Кавказа. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 178 с.
21. Шкудова Г.Я., Еремеева Г.В. Исследование течений в шельфовой зоне глубокого моря // Тр. ГОИН. 1981. Вып. 156. С. 75–88.
22. Zavialov P., Pelevin V., Rostovtseva V., Grabovskiy A., Khlebnikov D. Rivers of the Russian Black Sea Coast: Can their Impact on the Sea be Quantified? // European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, 15–20 April 2007. Geophys. Res. Abstracts on CD-Rom. 2007. V. 9.
23. Levy G., Brown R.A. A simple objective analysis scheme for scatterometer data // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. № C4. P. 5153–5158.
24. Pelevin V., Khlebnikov D., Karlsen G., Rostovtseva V., Hapter R. Ultraviolet laser fluorometry of Gdansk Bay waters (Baltic sea). // European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, 15–20 April 2007. Geophys. Res. Abstracts on CD-Rom. 2007. V. 9.