

УДК 551.465

## МЕТОД РАСЧЕТА ОСАЖДЕНИЯ И ПЕРЕМЕШИВАНИЯ АЛЛОХТОННОЙ ВЗВЕСИ НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ПО КОНЦЕНТРАЦИИ ВЗВЕСИ И СОЛЕННОСТИ

© 2015 г. П. О. Завьялов, Е. С. Барбанова, В. В. Пелевин, А. А. Осадчиев

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва**e-mail: peter@ocean.ru*

Поступила в редакцию 17.06.2015 г., после доработки 01.07.2015 г.

Предложен простой метод расчета осаждения и перемешивания взвеси речного происхождения в прибрежной зоне моря и картирования интенсивности оседания в приустьевых акваториях. Суть метода состоит в совместном анализе данных по солености и общей концентрации взвеси на поверхности моря. Значение солености позволяет определить относительное содержание речного стока в данной точке прибрежной акватории. Если бы аллохтонная взвесь не оседала, а только перераспределялась при смешении морских и речных вод, то ее концентрация также однозначно определялась бы относительным содержанием речного стока в воде и могла бы быть рассчитана по солености. Но на практике наблюдаемая концентрация оказывается обычно ниже значений, полученных таким способом, что связано с осаждением взвеси. Таким образом, величина осаждения может быть оценена как разность концентрации взвеси, “предписываемой” простым смешением морской и речной водных масс, и фактически наблюдаемой концентрации. Эта схема реализована на основе данных высокого пространственного разрешения, полученных в Черном море в приустьевом районе р. Мзымта с использованием ультрафиолетового флуоресцентного лидара (концентрация общей взвеси) и проточных измерений солености.

DOI: 10.7868/S0030157415060210

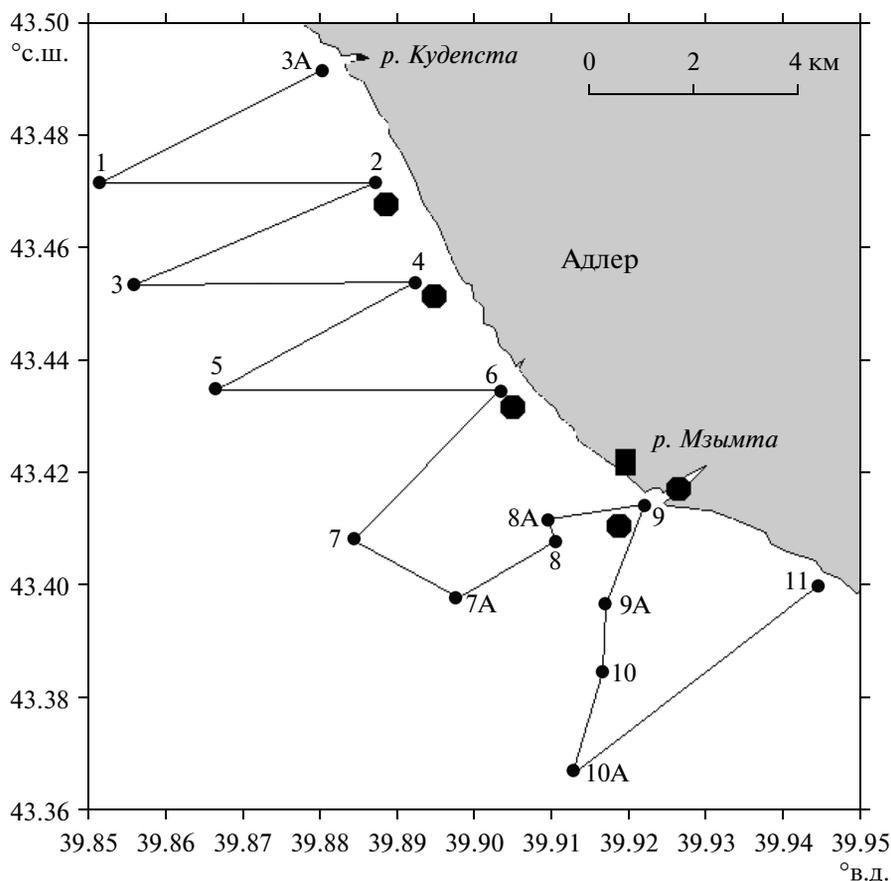
### ВВЕДЕНИЕ

Знание механизмов и количественных характеристик переноса и осаждения речных наносов и аллохтонной терригенной взвеси в прибрежной зоне моря является критически важным для целого ряда инженерных и научных задач. Объем литературы, посвященной переносу взвеси, огромен, и никакой перечень библиографических ссылок не оказался бы полным. Основные закономерности седиментации и переноса взвеси в океане были впервые обобщены еще во второй половине прошлого века в монографии Лисицына [4].

Между тем практический расчет осаждения и перемешивания речной взвеси в конкретных приустьевых акваториях моря и реальных гидрометеорологических и океанологических условиях остается крайне сложной задачей. Традиционные методы, связанные с отбором и анализом (в том числе гранулометрическим) проб, являются весьма трудоемкими. Кроме того, таким способом почти невозможно достичь высокого пространственного разрешения — а ведь во многих случаях, особенно для небольших рек, пространственная изменчивость концентрации взвеси в приустьевых районах реализуется на масштабах порядка сотен и даже десятков метров.

Авторы предлагаемой статьи не могут считать себя специалистами по процессам переноса взве-

си. Однако в их распоряжении оказались данные высокого разрешения по общей концентрации взвешенного вещества в прибрежном районе Черного моря у устья р. Мзымта, крупнейшей из рек в российском секторе моря, где в течение ряда лет авторами проводились мониторинговые исследования экологического состояния акватории. Данные по взвеси были получены с помощью дистанционного зондирования ультрафиолетовым флуоресцентным лидаром, действующим на ходу судна и обеспечивающим пространственное разрешение порядка нескольких метров. Одновременно с лидарными зондированиями также на ходу судна в проточном режиме выполнялись STD-измерения, в результате которых были получены, в частности, данные по поверхностной солености с пространственным разрешением порядка нескольких десятков метров. Возникла идея использовать высокоразрешающие данные по концентрации взвеси и по солености совместно. Как будет показано ниже, такой подход позволяет получить количественные оценки и высказать некоторые суждения относительно пространственных распределений интенсивности осаждения и перемешивания аллохтонной взвеси по исследуемой акватории, а также попытаться выявить связь этих процессов с гидрометеорологическими условиями.



**Рис. 1.** Пример организации измерений на полигоне Мзымта–Кудепста. Сплошная линия – траектория движения судна, точки – гидрологические станции, большие кружки – заякоренные станции с измерителями течений, квадратик – портативная метеостанция.

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Для расчетов применены данные, полученные в ходе 3-х экспедиций МНИС “Ашамба” в район исследования между устьями рек Мзымта и Кудепста – с 26 по 29 мая 2010 г., с 25 по 30 мая 2011 г. и с 16 по 19 мая 2012 г. Все три экспедиции проводились в один и тот же период года, в аналогичных условиях паводкового речного стока. В целях настоящего исследования были обработаны данные 9 отдельных однодневных съемок одного и того же полигона.

Измерения в каждой из экспедиций были организованы в виде 3–5 поперечных берегу разрезов длиной от 1.5 до 4 км (в зависимости от наблюдавшихся размеров речного плюма), обычно – от изобаты 5 м до изобаты 30, 40 или 50 м, при расстоянии между соседними разрезами 1–3 км. Непрерывные наблюдения параметров поверхностного слоя проводились при движении судна на разрезах и переходах между ними. Пример расположения разрезов на полигоне приведен на рис. 1.

Использовалось следующее измерительное оборудование.

1) Проточная зондирующая система, состоящая из подающего забортную воду центробежного насоса производительностью около 1 л/с и уложенного в специальный контейнер емкостью 30 л на палубе CTD-зонда SBE911 или SBE19plus. Затем данные осреднялись по 10-секундным интервалам.

2) Ультрафиолетовый флуоресцентный лидар УФЛ-8 или УФЛ-9, установленный на баке катера или судна, обеспечивал экспрессные определения концентрации общей взвеси на ходу судна с частотой 4 Гц. Технические характеристики лидара и способы пересчета из оптических единиц в весовые изложены в статье [1].

3) Непосредственно в русле реки Мзымта на глубине 1.5–2.5 м на дистанции 50–100 м от устья устанавливался измеритель скорости течения Aquadopp или SeaHorse. Прибор регистрировал 10-минутные осреднения скорости течения для оценки скорости струи речной воды в момент ее выхода в море.

4) Портативная автоматическая метеостанция HeavyWeather устанавливалась на берегу на высоте 8 м над уровнем воды вблизи устья реки, на открытом месте вдали от возвышений рельефа, высоких деревьев и сооружений. В течение всего периода измерений регистрировались 10-минутные осреднения скорости и направления ветра, а также всех основных метеозадающих элементов.

Более подробно организация работ на полигоне описана в нашей статье [3], характеристики ультрафиолетового флуоресцентного лидара — в статьях [1] и [5], а особенности применения точной измерительной системы — в статье [2].

### МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Суть метода состоит в совместном анализе данных по солености и общей концентрации взвеси на поверхности моря. Зная “фоновую” соленость морской воды вдали от устья реки и соленость речной воды в устье, по значению солености в той или иной точке прибрежной акватории можно однозначно определить относительное содержание речного стока в этой точке. Если бы аллохтонная взвесь не оседала, а только перераспределялась при смешении морских и речных вод, то ее концентрация также полностью определялась бы относительным содержанием речного стока в воде и могла бы быть рассчитана по фактической солености, а также начальной концентрации взвеси непосредственно в устье и фоновой концентрации взвеси в морской воде вдали от устья. На практике же обычно (кроме отдельных точек, расположенных, в основном, на мелководье и исключенных нами из рассмотрения) наблюдаемая концентрация взвеси оказывается ниже значений, полученных таким способом, что, по нашему предположению, связано с потерей части взвеси за счет осаждения. Таким образом, величина осаждения может быть оценена как разность концентрации взвеси, предписываемой смешением морской и речной водных масс, и фактически наблюдаемой концентрации.

Нетрудно получить формулы для расчета величин осаждения и перемешивания взвеси в соответствии с приведенной выше логической схемой.

Пусть  $P$  обозначает количество взвеси ( $\text{г}/\text{м}^3$ ), осевшей из исследуемого элемента воды с момента выхода воды из устья до момента измерения,  $M$  — количество взвеси ( $\text{г}/\text{м}^3$ ), ушедшей из этого элемента в результате турбулентного перемешивания с окружающей морской водой,  $C_{\max}$  и  $C_{\min}$  — значения концентрации взвеси ( $\text{г}/\text{м}^3$ ) в речном устье и в море вне зоны влияния речного стока соответственно,  $S_{\max}$  и  $S_{\min}$  — значения солености в море вне зоны влияния речного стока и в речном устье соответственно, а  $C_{obs}$  и  $S_{obs}$  — текущие значения концентрации взвеси и солености в данной

точке полигона, где нам необходимо рассчитать  $P$  и  $M$ . Рассмотрим единичный объем воды в исследуемой точке и постулируем, что эта вода представляет собой результат смешения некоторого объема  $v$  “речной” воды с соленостью  $S_{\min}$  и объема  $(1 - v)$  “морской” воды с соленостью  $S_{\max}$ . Тогда из требования сохранения общей массы соли следует, что

$$vS_{\min} + (1 - v)S_{\max} = S_{obs}, \quad (1)$$

откуда

$$v = (S_{\max} - S_{obs}) / (S_{\max} - S_{\min}). \quad (2)$$

Теперь нам известны относительные объемные содержания речной и фоновой морской водных масс в исследуемом элементе воды. Уравнение баланса, аналогичное уравнению (1), можно записать и для концентрации взвеси:

$$v(C_{\max} - P/2) + (1 - v)C_{\min} = C_{mix}, \quad (3)$$

где  $C_{mix}$  — концентрация взвеси, которая должна была получиться в результате смешения речной и морской водных масс. Первый член в (3) требует пояснения. В отличие от солености, которая меняется только в результате перемешивания, концентрация взвеси уменьшается вследствие как перемешивания, так и осаждения. Поэтому в перемешивании с морской водой в период между выходом элемента воды из устья и наблюдениями участвовала речная водная масса не с исходной концентрацией взвеси  $C_{\max}$ , а с некоторой более низкой “эффективной” концентрацией, находящейся в пределах от  $(C_{\max} - P)$  в точке наблюдения до  $C_{\max}$  у устья. Если допустить упрощающее предположение о том, что осаждение взвеси из каждой жидкой частицы происходило с постоянной скоростью, то среднюю за период перемешивания концентрацию взвеси в речной воде, смешивавшейся с морской, можно принять равной  $C_{\max} - P/2$ , что и использовано в уравнении (3).

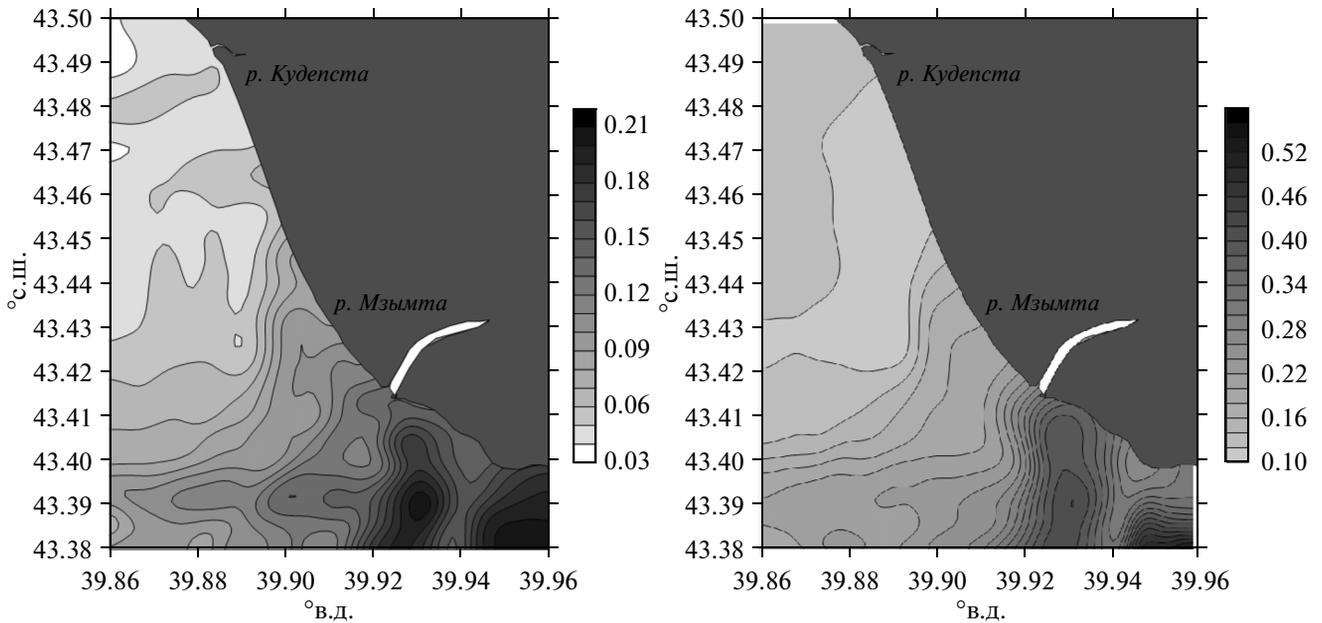
По определению,  $C_{mix} = C_{obs} + P$ . Подставляя это соотношение в (3), получим уравнение на  $P$ . Кроме того, также по определению  $M = C_{\max} - C_{mix}$ . После простых преобразований окончательно получаем расчетные формулы:

$$P = 2[v(C_{\max} - C_{\min}) + C_{\min} - C_{obs}] / (2 + v), \quad (4)$$

$$M = C_{\max} - v(C_{\max} - P/2) - (1 - v)C_{\min}, \quad (5)$$

где  $v$  определяется соотношением (2).

Таким образом, для того чтобы оценить “аккумулированное” осаждение аллохтонной взвеси в каждой жидкой частице, достаточно измерить в интересующей точке лишь общую концентрацию взвеси и солености, а также определить реперные значения концентрации взвеси и солености непосредственно в речном устье и на большом удалении от него. При практической реализации этой схемы в настоящей работе данные лидара и про-



**Рис. 2.** Пространственные распределения количеств аллохтонной взвеси, выведенной из распространяющейся в море речной воды в результате осаждения (слева) и перемешивания (справа), % от начальной концентрации взвеси в устье. Осреднение за 9 суток.

точной измерительной системы интерполировались в узлы регулярной сетки с шагом 100 м, затем для каждого узла по формулам (4)–(5) рассчитывались количества осевшей и “перемешавшейся” взвеси.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из материалов 3-х экспедиций удалось выделить 9 однодневных съемок, для которых имелись одновременные данные по солености и по концентрации взвеси (27–30 мая 2010 г., 28–31 мая 2011 г. и 16 мая 2012 г.).

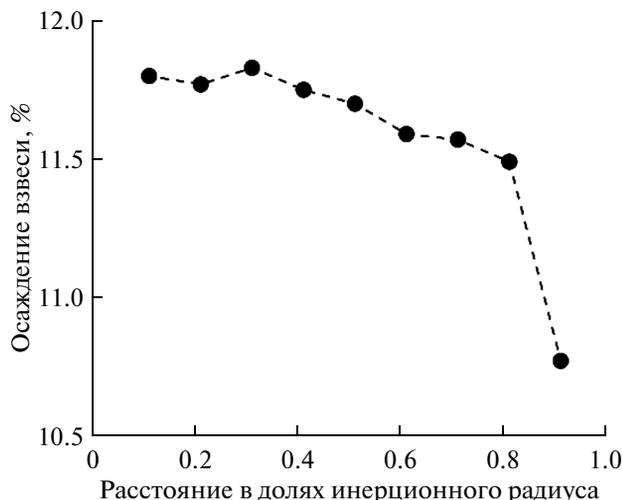
На рисунке 2 представлены осредненные за 9 суток распределения количества осевшей взвеси и взвеси, потерянной в результате турбулентного перемешивания, по акватории полигона. Можно отметить следующие основные особенности этих распределений.

Структуры пространственных распределений осевшей и “перемешавшейся” взвеси почти повторяют друг друга, хотя по абсолютной величине в большинстве узлов сетки в плюме перемешивание примерно вдвое, а вне плюма – в 3 раза и более превышает осаждение. Области наиболее интенсивного осаждения и перемешивания взвеси локализуются южнее и юго-восточнее речного устья, где наиболее часто в течение отобранных для исследования дней находился речной плум.

Интересно отметить также следующую особенность: максимальные значения как осаждения взвеси, так и потерь ее при перемешивании на-

блюдаются не непосредственно у устья (где сама концентрация взвеси максимальна), а на расстоянии от него примерно 1 км. Можно предположить, что на меньших расстояниях от устья речная струя в море все еще сохраняет высокую скорость благодаря инерции и проходит эту область за относительно короткое время, а потому большое количество взвеси осесть или перемешаться не успевает.

На рис. 3 показана осредненная за 9 дней зависимость величины осаждения взвеси от расстояния до речного устья. Рассматривая эту функцию, имеет смысл расстояние выражать не в абсолютных единицах, а в долях инерционного радиуса  $R_{in} = U/f$ , где  $U$  – начальная скорость частицы в устье, а  $f$  – параметр Кориолиса. Действительно, абсолютные горизонтальные размеры взвесеносущего речного плюма существенно зависят от скорости стока в конкретных условиях, в то время как величины, масштабированные на инерционный радиус, дают более унифицированное представление о закономерностях внутренней структуры плюма. Значения инерционного радиуса меняются во времени в зависимости от интенсивности речного стока, они могут быть оценены по данным измерителя скорости течения, установленного непосредственно в устье реки, что и было сделано для каждого дня измерений. Затем для каждого дня вычислялось среднее (по пространственным координатам) значение осаждения, рассчитанного по формуле (4) для точек сетки, попадающих в область, ограниченную



**Рис. 3.** Зависимость количества осевшей речной взвеси (% от начальной концентрации) от расстояния до устья, нормированного на инерционный радиус.

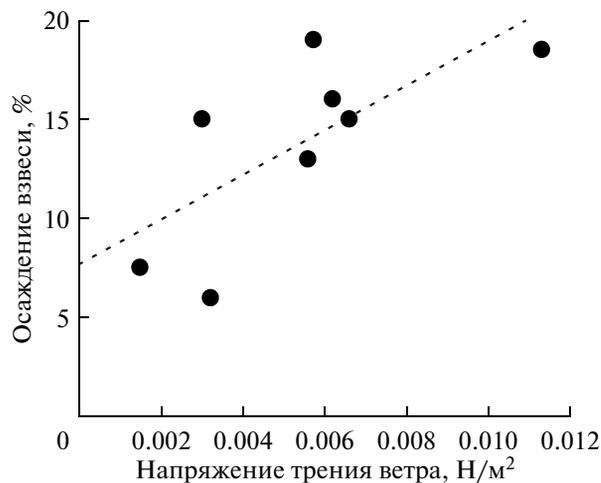
окружностями с радиусами  $0.1R_{in}$  и  $0.2R_{in}$ ,  $0.2R_{in}$  и  $0.3R_{in}$ , ...,  $0.9R_{in}$  и  $R_{in}$ . Далее эти значения усреднялись за все 9 дней, и таким образом строилась кривая на рис. 3.

Поскольку такая процедура связана со значительным осреднением по пространству и времени, итоговая зависимость оказывается сглаженной, и изменчивость осадения взвеси в ней по абсолютным значениям мала по сравнению с наблюдениями за отдельные дни. Однако видно, что величина осадения принимает наибольшие значения на небольших расстояниях от устья порядка  $0.3R_{in}$ . В этой области, формально говоря, имеется локальный максимум, что согласуется со сказанным выше при обсуждении рис. 1 (впрочем, максимум этот невелик, и значимость его, конечно, может быть поставлена под сомнение). Затем при дальнейшем увеличении расстояния от устья осадение сперва медленно, а затем резко уменьшается.

Наконец, на рис. 4 представлена зависимость количества взвеси, осевшей в пределах круговой области с центром в устье реки, ограниченной инерционным радиусом, от величины напряжения трения ветра  $\tau$ . Последняя рассчитывалась по измерениям скорости ветра по формуле

$$\tau = \rho_a C_D V_{10}^2, \quad (6)$$

где  $\rho_a$  — плотность воздуха,  $V_{10}$  — скорость ветра на высоте 10 м, а  $C_D$  — коэффициент шероховатости [6]. Определялось среднее значение напряжения трения ветра за соответствующий день. При этих расчетах был исключен из рассмотрения случай 28 мая 2011 г., характеризовавшийся прохождением



**Рис. 4.** Зависимость количества речной взвеси (% от начальной концентрации), осевшей в круге инерционного радиуса с центром в устье реки, от напряжения трения ветра. Использовано среднее значение ветра за текущий день.

атмосферного фронта и большой изменчивостью ветра в течение дня.

Несмотря на довольно большой разброс точек, из рис. 4 можно сделать довольно неожиданный вывод: по результатам наших измерений и расчетов, в рассмотренные дни наблюдений интенсивность осадения взвеси в целом увеличивалась при усилении ветра. Пунктиром на рисунке показана линейная регрессия с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0.51$ . Насколько нам известно, подобная зависимость для приустьевых районов ранее не отмечалась. Гипотетически она может быть связана с усилением коагуляции частиц взвеси при увеличении турбулентного обмена в приповерхностном слое. Этот возможный механизм станет одним из предметов дальнейших исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен простой метод расчета осадения и перемешивания взвеси речного происхождения в прибрежной зоне моря и картирования интенсивности оседания в приустьевых акваториях. Суть метода состоит в совместном анализе балансов пресной воды и взвеси на основе данных по солёности и общей концентрации взвеси на поверхности моря.

К преимуществам этого метода, по нашему мнению, можно отнести его относительную техническую простоту и возможность достичь необходимого высокого пространственного разрешения с использованием измерений, которые во многих экспедициях Института океанологии РАН в настоящее время выполняются на почти

рутинной основе. Большое количество таких данных по приустьевым районам Черного, Карского, Южно-Китайского морей, а также озерам Иссык-Куль и Балатон было накоплено за предыдущие годы, и, вероятно, оно будет увеличиваться в будущем. Эти данные могут быть использованы в том числе и в указанных целях, что позволит значительно расширить объем натурной информации о процессах переноса и осаждения взвеси.

Конечно, метод имеет и серьезные ограничения. Прежде всего, он существенно зависит от предположения, что пресноводный сток конкретной реки является единственным источником поступления дополнительной взвеси в морскую акваторию вблизи устья этой реки, что, конечно, не в полной мере соответствует истине — вообще говоря, следует учитывать и возможную адвекцию взвеси от удаленных источников, и эоловый вынос материала с суши, и ресуспендирование осадков со дна на мелководье (последний фактор, вероятно, и был причиной того, что в отдельных точках вблизи берега расчеты по формулам (4)–(5) иногда приводили к отрицательным значениям осаждения, как уже отмечалось выше). Предложенный метод применим лишь к тем ситуациям, когда вклад реки в поступление взвеси в море значительно превышает вклад других механизмов. Такие ситуации, впрочем, во многих случаях реализуются в приустьевых районах. Использованное при выводе формул (4)–(5) представление о постоянстве скорости осаждения во времени также является упрощенным. Наконец, к недостаткам метода относится и то обстоятельство, что он позволяет оценивать лишь интегральное массовое осаждение взвеси и не дает никакой информации об изменениях ее грануло-

метрического состава (что, однако, в некоторых отношениях может считаться и преимуществом, поскольку метод не требует затратных гранулометрических анализов). В целом, по нашему мнению, предложенный подход может оказаться полезным инструментом изучения процессов осаждения и перемешивания аллохтонной взвеси в прибрежной зоне.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 14-50-00095).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айбулатов Н.А., Завьялов П.О., Пелевин В.В. Особенности гидрофизического самоочищения российской прибрежной зоны Черного моря близ устьев рек // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2008. № 4. С. 301–310.
2. Завьялов П.О., Ижицкий А.С., Осадчиев А.А. и др. Структура термохалинных и био-оптических полей на поверхности Карского моря в сентябре 2011 г. // Океанология. 2015. Т. 55. № 4. С. 514–525.
3. Завьялов П.О., Маккавеев П.Н., Коновалов Б.В. и др. Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря // Океанология. 2014. Т. 54. № 3. С. 293–308.
4. Лисицын А.П. Процессы океанской седиментации. М.: Наука, 1977. 438 с.
5. Palmer S.C., Pelevin V.V., Goncharenko I.V. et al. Ultra-violet fluorescence LiDAR (UFL) as a measurement tool for water quality parameters in turbid lake conditions // Remote Sensing. 2013. V. 5. № 9. P. 4405–4422.
6. Smith S.D. Wind stress and heat flux over the ocean in gale force winds // J. of Physical Oceanography. 1980. V. 10. № 5. P. 709–726.

## Method for Estimating Settling of River-Borne Suspended Matter Based on Joint Analysis of TSM Concentration and Salinity

P. O. Zavialov, E. S. Barbanova, V. V. Pelevin, A. A. Osadchiev

A simple method is developed for estimating river-borne suspended matter settling rates and mapping the intensity of settling. The essence of the method consists in joint analysis of total suspended matter (TSM) concentration data and salinity data. Salinity value allows to determine the relative content of the river runoff in the sea water. If the suspended matter were not subject to settling down, its concentration would be fully determined by relative content of river water in the sea water and could be calculated based on salinity. However, the factual TSM concentration is normally lower than that estimated from salinity because of settling. Hence, the amount of TSM that settled down from a specific water parcel can be obtained as the difference between the concentration “prescribed” by linear mixing of the river water and sea water masses and the factual concentration. This scheme was implemented based on high resolution data collected in field campaigns in the Black Sea near Mzymta River mouth. The TSM concentration was obtained using ultraviolet fluorescent lidar, while salinity was measured by a pump-through CTD system.