

УДК 551.463.8

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СКОРОСТИ ОСАЖДЕНИЯ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА ВОД В УСТЬЕ ДОНА И ТАГАНРОГСКОМ ЗАЛИВЕ

© 2021 г. В. С. Герасюк<sup>1</sup>, С. В. Бердников<sup>1</sup>, \*<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН,  
Ростов-на-Дону, Россия

\*e-mail: berdnikovsv@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.06.2020 г.

После доработки 12.10.2020 г.

Принята к публикации 18.03.2021 г.

Выполнено экспериментальное определение влияния солености и других контролирующих факторов (концентрация взвеси, органический материал) на скорость оседания частиц пелитовой и алевритовой размерности в устьевой области р. Дон и Таганрогском заливе. В лабораторных условиях изучалось изменение концентрации взвеси в пресной и соленой воде после внесения в нее суспензии частиц из проб донных отложений, отобранных в дельте р. Дон. Свежеотобранные пробы содержали частицы алевритовой (0.1–0.01 мм), пелитовой (0.01–0.001 мм) размерности, также субколлоидной фракции (<0.001 мм). Для объяснения наблюдаемой в эксперименте динамики осветления воды в результате осаждения взвеси предложено три модели: 1) взвесь однородна по размерам, скорость оседания не изменяется со временем; 2) взвесь неоднородна по размерам и состоит из двух размерных групп частиц, имеющих разную скорость оседания (в частности, предполагается, что процесс укрупнения взвеси (аналог коагуляции, флокуляции) происходит “мгновенно” в первые минуты эксперимента); 3) процесс укрупнения взвеси происходит не мгновенно, а в течение первых 20 мин после поступления взвеси в среду, потом взвесь начинает оседать. Показано, что экспериментальным данным удовлетворяют вторая и третья модели. При этом скорость оседания увеличивается с ростом концентрации взвешенного вещества после внесения суспензии, как в пресную, так и в морскую среду. Максимальная скорость осаждения частиц пелитовой размерности наблюдается в диапазоне солености 2–4 г/л. После удаления органического материала из суспензии взвеси скорость оседания уменьшилась более чем в 2 раза в диапазоне солености 0–9 г/л.

**Ключевые слова:** экспериментальные исследования, взвешенное вещество, скорость осаждения, эстуарий, соленость, Таганрогский залив, устье Дона

DOI: 10.31857/S0030157421040055

### ВВЕДЕНИЕ

Вопросы осадконакопления в переходных зонах системы река–море (маргинальных фильтрах (МФ) по терминологии А.П. Лисицына [8]) остаются актуальными по сей день во всем мире [5–7, 10, 11, 24–26, 28]. Отмечается, что “главное значение для крупных (алевритовых и песчаных) зерен взвеси играет резкое снижение скорости несущего потока, что приводит к уменьшению вертикальной составляющей турбулентного потока и осаждению частиц. Для более мелких частиц пелитовой размерности, обладающих свойствами природных коллоидов, главное значение имеет другой процесс – смешение пресной воды с морской – электролитом. Это приводит к коагуляции и массовому выпадению тонкой части взвеси. ... Главные процессы в МФ идут в его второй, солоноватоводной части, причем особенно в

ее начале, в интервале солености 1–5‰. Здесь возникают уникальные участки, где концентрация взвеси выше, чем в конечных членах смешения – в речных и морских водах. Это связано с процессами коагуляции и флокуляции, когда под влиянием электролита растворенная органика, железо, алюминий и ряд других элементов переходят из раствора во взвесь” [8].

Устьевая область р. Дон и Таганрогский залив отнесены к областям лавинной седиментации со скоростью осадконакопления 100 мм/1000 лет [9]. Это довольно высокие скорости. Оценки, выполненные для периода 1987–2000 гг., дают скорость накопления сухого терригенного материала в донных отложениях Таганрогского залива на уровне 500–1000 г/м<sup>2</sup> в год, что примерно на два порядка ниже – 1 мм/1000 лет [18].

В связи с гидротехническим строительством на Нижнем Дону годовой твердый сток сократился до 400 тыс. т [16–18]. С 2007 г. на Нижнем Дону наблюдается маловодный период. Имеются оценки, что в 2010–2014 гг. в створе станицы Раздорская годовой твердый сток уменьшился до 150 тыс. т [4]. В условиях экстремально низкого донского стока наблюдается проникновение соленых вод глубоко в дельту [12]. После создания Цимлянского водохранилища и ряда низконапорных гидротехнических сооружений ниже по течению существенно трансформировался гранулометрический состав речной взвеси, выносимой на морской край дельты [2, 13, 17, 20]. Эти изменения не могли не отразиться на процессах переноса и седиментации взвешенных наносов в устьевой области Дона и в Таганрогском заливе.

В период 2006–2018 гг. выполнялись экспедиционные исследования гидрологического и гидрохимического режима на Нижнем Дону и в Таганрогском заливе. Результаты измерений в дельте Дона (за период 2007–2014 гг.) показывают, что содержание взвеси в донской воде в среднем колеблется в интервале 20–30 мг/л. Минимальные (3 мг/л) значения концентрации взвеси характерны для зимнего сезона, когда река покрыта льдом, максимальные (до 50–70 мг/л) – для весеннего и летнего сезонов [19]. В устьях рукавов концентрация взвеси увеличивается, причинами этому могут быть стонно-нагонные колебания вод, вызывающие взмучивание донных осадков мелководного взморья. Концентрация взвешенного органического углерода изменялась в диапазоне 0.05–3.72 мгС/л, а медиана всех измеренных значений составила 0.53 мгС/л, среднее содержание органического углерода в общей взвеси составляло 4–5%. Несмотря на большое половодье в 2018 г., ситуация в целом сохраняется.

В работе [11] при изучении геохимии взвешенного вещества в устьевой области Волги авторы выделяют три этапа МФ – гравитационный (зона с соленостью 0–2 г/л), коагуляционно-сорбционный (зона с соленостью 2–7 г/л) и биологический (соленость >7 г/л). Отмечается, что во второй зоне происходят основные процессы трансформации состава взвешенного вещества, для нее характерно увеличение концентрации взвеси за счет физико-химических процессов (коагуляции и флокуляции органических и металлоорганических коллоидов) с максимальными значениями при солености 5.5–6 г/л.

Наблюдения в Таганрогском заливе, выполненные практически во все сезоны 2006–2018 гг. (в интервале изменения солености 0–10 г/л), показывают, что рассмотренная выше “классическая” схема с максимумом концентрации взвеси при солености 5.5–6 г/л наблюдается крайне редко (рис. 1). Увеличение концентрации взвеси

наблюдается при разных значениях солености. Это может быть связано с продукционными процессами, результатом взмучивания донных отложений при штормах, а также с физико-химическими процессами (коагуляция, флокуляция), но степень детальности проводимых геохимических исследований не позволяет делать здесь однозначные выводы. Более того, проникновение при штормовых нагонах соленых вод в дельту приводит к тому, что зона с соленостью вод 0–5 г/л располагается уже не на устьевом взморье, а непосредственно в рукавах и на затопляемых участках. Так, при экстремальном нагоне в сентябре 2014 г. вода с соленостью 5 г/л достигла водозабора г. Азов (20 км от устья Дона, середина дельты) [12].

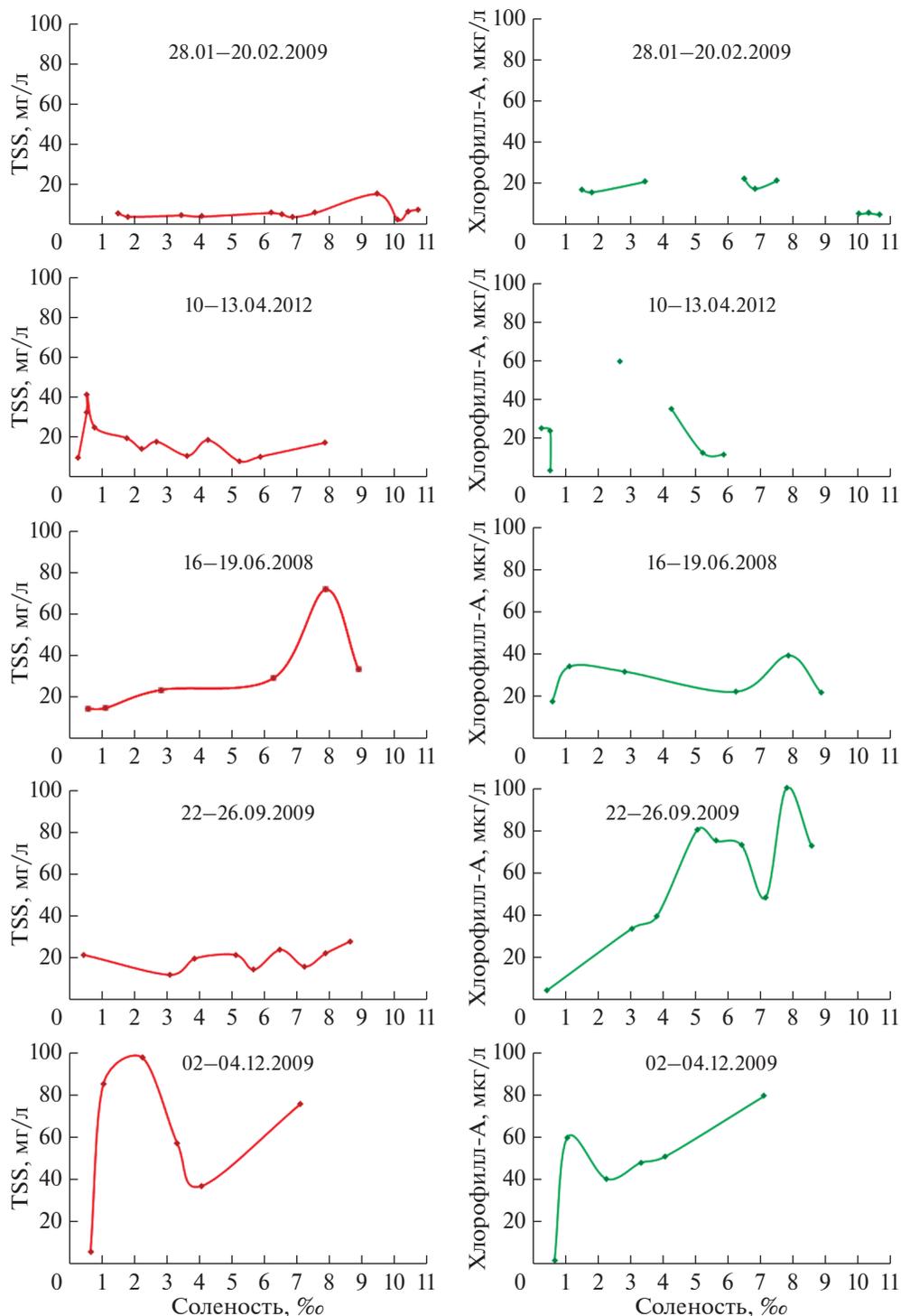
Таким образом, механизмы процессов, происходящих на границе “река–море”, сложны, а влияние основных контролирующих параметров на скорость оседания природных частиц неоднозначно и является предметом дискуссий.

В ранних работах особое внимание уделялось исследованиям взаимосвязи скоростей осадения и минерального состава взвешенного вещества, а также проводились подробные микроскопические исследования самих флокул [21–23]. В ходе полевых и лабораторных измерений было установлено, что даже в случае одинаковой концентрации взвеси в пределах одного и того же района могут происходить большие изменения в скоростях оседания, вплоть до двух порядков по величине [27].

Проведение экспериментальных исследований не прекращаются. Так, в работе [24] выявлено усиление флокуляционных процессов с увеличением концентрации взвеси, но не с увеличением солености. Наибольшая скорость наблюдалась при высокой концентрации взвеси и солености ниже 2.5 г/л, а при солености выше 20 г/л – чем ниже концентрация взвеси, тем выше скорость осадения.

При разработке математической модели переноса и седиментации взвешенного вещества в Азовском море [18] выделено 5 размерных фракций взвеси, также был предусмотрен переход частиц из одной фракции в другую с изменением солености (аналог механизма коагуляции). Однако из-за отсутствия количественных данных о скорости осадения (при разной солености) частиц взвеси основных размерных фракций, присутствующих в устьевой области р. Дон и Таганрогском заливе (пелит и мелкий алеврит), этот механизм фактически не был применен.

Цель настоящей работы – экспериментально оценить влияние солености, концентрации взвеси и ее органической составляющей для понимания того, что следует ожидать в области смешения донских вод с водами Азовского моря.



**Рис. 1.** Примеры зависимости концентрации взвеси (мг/л) и хлорофилла-А от солености в экспедиционных исследованиях в Таганрогском заливе.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалом для работы послужили пробы донных отложений, отобранные при помощи дночерпателя Петерсена в дельте р. Дон на рас-

стоянии 30 м от уреза воды (47°06.607' с.ш., 39°18.733' в.д.). Первоначальный гранулометрический анализ показал, что свежесобранные пробы содержат в себе два основных размерных класса частиц: алеврит (0.1–0.01 мм) и пелит

(0.01–0.001 мм), также среди пелита выделяется субколлоидная фракция (<0.001 мм).

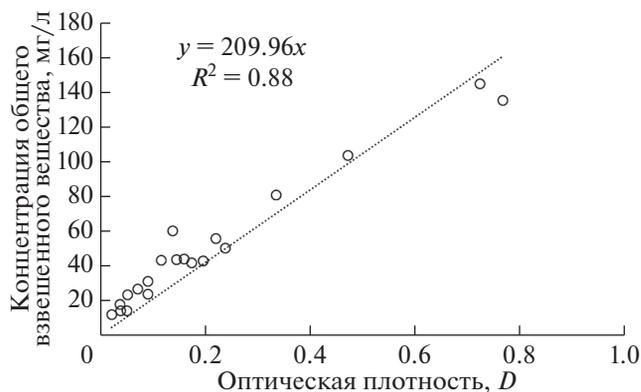
**Предварительная обработка проб и подготовка материала для экспериментов.** Обработка проб производилась по методу [1]. На подготовительном этапе эксперимента навеску пробы естественной влажности помещали в стакан с водопроводной водой, кипятили и подвергали ультразвуковой обработке в течение 3 мин. Этого времени достаточно, чтобы разрушить глинистые агрегаты, но не затронуть минералы. Далее суспензию из стакана переливали в мерный цилиндр (объем 1000 мл, диаметр 60 мм), доводили объем воды до 1000 мл и взбалтывали полученную суспензию. Предварительно перед сбором пелитовой фракции в сосуды производилось 2–3 слива воды для очистки суспензии от частиц органического вещества алевритовой размерности. После каждого слива объем воды в сосуде снова доводили до 1000 мл и взмучивали. Через 28 мин, в соответствии с таблицей времени осаждения частиц различного диаметра по [14], производили слив примерно 500–600 мл воды, содержащей взвесь, из средней части мерного цилиндра. Слив производили несколько раз в предварительно подготовленные пластиковые сосуды объемом 1500 мл до их полного заполнения. Затем заполненные сосуды оставляли до максимального осаждения частиц, далее избавлялись от лишнего объема воды и получали густой объем взвеси.

Размерный состав частиц полученной взвеси был установлен с использованием лазерных анализаторов Shimadzu (марка SALD-201V) и ЛАСКА-Т (Д).

Содержание органического вещества в пробе донных отложений анализировали по методу Тюрина в модификации ЦИНАО [3]. Оставшуюся терригенную взвесь после сжигания в ней органического вещества использовали на следующем этапе эксперимента для установления роли органической составляющей в процессе осаждения.

С использованием фильтрованной через стекловолокнистый фильтр марки GF/F (диаметр пор 0.7 мкм) воды Черного моря (с содержанием солей 19 г/л) и водопроводной воды с минерализацией 0.7 г/л были приготовлены серии растворов различной солености (1–9 г/л). Раствор воды соленостью 35 г/л был приготовлен с добавлением морской соли в нужной пропорции.

**Ход проведения эксперимента.** При помощи пипетки Мора в каждый пластиковый сосуд объемом 1500 мл с водой определенного содержания солей добавляли одинаковое количество густой водной суспензии и тщательно перемешивали. Через равные промежутки времени из каждого сосуда с глубины 1.5 см от поверхности мерной пипеткой (объем 20 мл) отбирали пробы для измерения оптической плотности полученных



**Рис. 2.** Результат калибровки фотометра “Эксперт-003” для определения содержания общего взвешенного вещества.

суспензий, при этом избегали взмучивания образовавшегося осадка. Первый час измерения проводились каждые 10 мин, следующие 2–3 ч – примерно раз в 30 мин до тех пор, пока значения оптической плотности стабилизировались. Оптическая плотность частиц в воде регистрировалась при помощи фотометра “Эксперт-003” на длине волны 880 нм в 5-см кювете. Предварительно была проведена процедура калибровки фотометра во время экспедиции в район Нижний Дон–восточная часть Таганрогского залива, в результате чего была получена калибровочная кривая ( $R = 0.96$ ) зависимости оптической плотности от концентрации взвешенного вещества, измеренного гравиметрическим методом [15], что позволило получить абсолютные значения содержания взвеси в мг/л (рис. 2).

**Обработка результатов экспериментов.** Результаты определения оптической плотности отобранных из сосудов суспензий заносили в таблицу с указанием времени отбора пробы в минутах относительно начала эксперимента.

По формуле (1) выполняли оценку концентрации взвеси ( $C$ , г/м<sup>3</sup>), соответствующей оптической плотности ( $D$ , у.е.) раствора, измеренной фотометром “Эксперт-003” на длине волны 880 нм в 5-сантиметровой кювете:

$$C = 209.86D. \tag{1}$$

Для оценки динамики концентрации взвеси в верхней части пластикового сосуда рассматривались три модели (M1, M2 и M3).

В модели M1 (рис. 3) предполагалось, что скорость оседания частиц не изменяется. Тогда нормированная кривая изменения концентрации взвеси со временем аппроксимируется следующей формулой (2):

$$\delta C(t) = D(t)/D(0) = C(t)/C(0) = \exp(-mt), \tag{2}$$

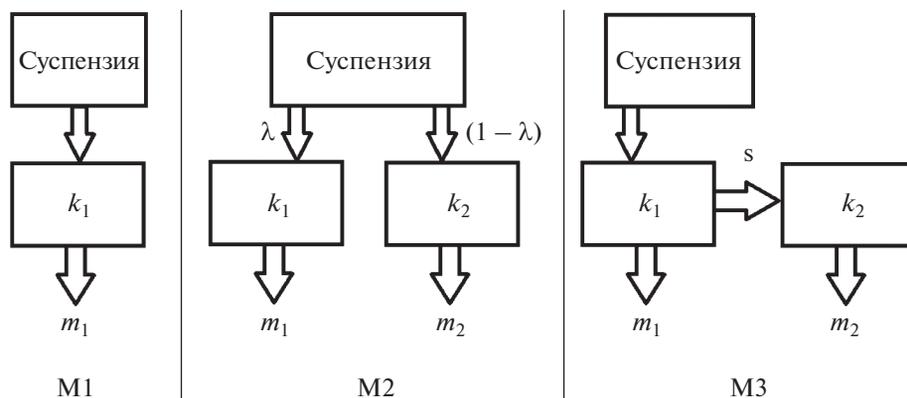


Рис. 3. Схематическое представление трех моделей (M1, M2 и M2) “поведения” частиц суспензии после переноса в экспериментальный сосуд с водой разной солёности.

где:

$\delta C(t)$  – нормированная концентрация взвеси в момент времени  $t$ ;

$D(t)$ ,  $D(0)$  – измеренная оптическая плотность раствора в момент времени  $t$  и в начальный момент времени;

$C(t)$ ,  $C(0)$  – концентрация взвеси, рассчитанная по формуле (1) в момент времени  $t$  и в начальный момент времени, мг/л;

$t$  – время от начала эксперимента, мин;

$m$  – интенсивность осветления воды в результате оседания взвешенных частиц, 1/мин.

Скорость оседания частиц (гидравлическая крупность,  $\omega$ ) связана с величиной  $m$  соотношением (3):

$$\omega \cong mH, \quad (3)$$

где  $H$  – высота слоя воды, из которого осажается взвесь, в нашем случае – 1.5 см.

В модели M2 (рис. 3) мы предполагаем две возможности. Во-первых, экспериментальная суспензия может состоять из частиц разного размера, поэтому у них будет разная скорость оседания. Во-вторых, можно предположить, что после попадания суспензии в водную среду в результате процессов коагуляции (флокуляции) формируется две группы частиц, имеющих разный размер и соответственно разные скорости осаждения. Тогда нормированная кривая изменения концентрации взвеси со временем аппроксимируется следующей формулой (4):

$$\begin{aligned} \delta C(t) &= D(t)/D(0) = C(t)/C(0) = \\ &= \gamma \exp(-m_1 t) + (1 - \gamma) \exp(-m_2 t), \end{aligned} \quad (4)$$

где:

$\gamma$  – доля частиц, имеющих более низкую скорость осаждения;

$m_1$ ,  $m_2$  – интенсивность осветления воды в результате оседания менее крупных и более крупных взвешенных частиц, соответственно, 1/мин.

При этом в качестве оценки средней интенсивности осветления воды можно использовать следующее соотношение (5):

$$m = \gamma m_1 + (1 - \gamma) m_2. \quad (5)$$

В модели M3 (рис. 3) реализована другая возможность. Частицы суспензии меньшего размера, попадая в воду, начинают укрупняться от размера  $k_1$  до размера  $k_2$ .

Динамические уравнения имеют вид (6):

$$\begin{aligned} dC_1/dt &= -(m_1 + s)C_1, \quad dC_2/dt = sC_1 - m_2C_2, \\ C(t) &= C_1(t) + C_2(t), \quad C(0) = C_1(0), \quad C_2(0) = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где:

$C(t)$  – общее содержание взвеси в момент времени  $t$ , мг/л;

$C_1(t)$  – концентрация взвеси размера  $k_1$ , мг/л;

$C_2(t)$  – концентрация взвеси размера  $k_2$ , мг/л;

$s$  – интенсивность укрупнения взвеси, 1/мин;

$m_1$ ,  $m_2$  – интенсивность осветления воды в результате оседания менее крупных и более крупных взвешенных частиц, соответственно, 1/мин.

Здесь предполагается, что в начальный момент времени в суспензии нет частиц размера  $k_2$ , т.е.  $C_2(0) = 0$ .

Тогда нормированная кривая изменения концентрации взвеси со временем аппроксимируется следующей формулой (7):

**Таблица 1.** Гранулометрический состав экспериментальных суспензий, %

Этап проведения эксперимента		Алеврит (мм)		Пелит (мм)		
		0.1–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001
I		14	58	17	11	–
II	1 серия	3	32	29	33	3
	2 серия	–	4	31	60	5
III		1	28	37	33	1

Примечание: “–” не обнаружено.

$$\delta C(t) = D(t)/D(0) = C(t)/C_1(0) = \begin{cases} = \exp(-m_1 + s)t + st \exp(-m_2 t), \\ \text{если } m_2 = m_1 + s \\ = (1 - r) \exp(-m_1 + s)t + r \exp(-m_2 t), \\ \text{если } m_2 \neq m_1 + s, \\ r = s / (m_1 + s - m_2). \end{cases} \quad (7)$$

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ**

Экспериментальные работы состояли из 3 этапов. Проба донных отложений для формирования экспериментальной суспензии взвеси отбиралась непосредственно перед проведением каждого этапа. Гранулометрический состав частиц в экспериментальных суспензиях приведен в табл. 1.

**Этап 1.** Задача первого этапа заключалась в оценке влияния концентрации взвеси на скорость ее осаждения в пресных и “морских” водах. Для этого в три емкости с пресной (0.7 г/л) и в три емкости с соленой (35 г/л) водой добавили одинаковые порции (1.5, 7.5, 15 мл) высококонцентрированной суспензии с содержанием в ней как пелитовых, так и алевритовых фракций (табл. 1).

В первой серии природная взвесь состояла из частиц алевритовой (72%) и пелитовой (28%) размерности. В пересчете на концентрацию взвеси в воде ее значения после внесения в воду изменялись от 70 до 560 мг/л. Наиболее значительное снижение содержания частиц наблюдается в течение первых 30 мин (рис. 4). В сосудах с пресной водой примерно на 100 мин эксперимента концентрация взвеси стабилизировалась. В сосудах с соленой водой взвесь продолжала оседать. В качестве оценки скорости оседания рассчитана доля осевшей (из верхнего слоя 1.5 см) взвеси за первые 30 мин эксперимента.

Первый этап экспериментов позволил сделать следующие выводы:

- в соленой воде взвесь начинает осаждаться быстрее, чем в пресной;
- на скорость осаждения взвеси влияет начальная концентрация взвеси (после внесения высококонцентрированной суспензии в воду и

перемешивания), но больше в соленой воде, чем в пресной;

– динамика изменения концентрации взвеси не аппроксимируется моделью М1.

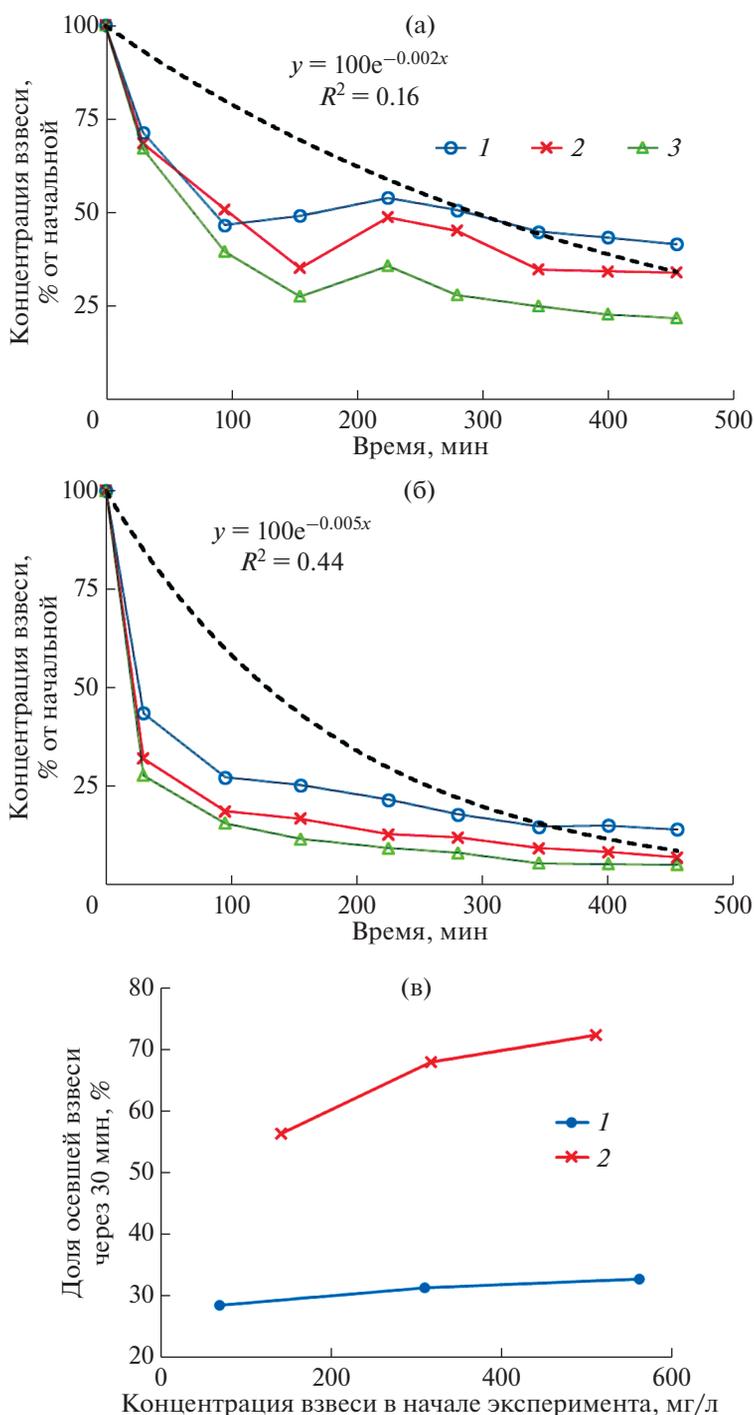
Результаты этого эксперимента привели к необходимости изменить подход к дальнейшему проведению работ. Было принято решение максимально устранить из суспензии частицы алевритовой размерности, проводить эксперименты в сосудах с водой, где солёность изменялась от 0.7 до 10 г/л с шагом 1 г/л, и добиться, чтобы начальная концентрация взвеси была близка к наблюдаемой в устьевой области Дона – порядка 100 мг/л.

**Этап 2.** На втором этапе выполнено 2 серии экспериментальных работ. В первой серии не удалось существенно снизить долю частиц алевритовой размерности, во второй серии их доля уже не превышала 4% (табл. 1).

Типичный график эксперимента представлен на рис. 5. Здесь показана динамика  $\delta C(t)$  и ее аппроксимация моделями М1–М3. Справа представлены диаграммы соответствия между экспериментальными данными и оценками с применением модели М2 и М3.

Оценка параметра  $m$  модели М1 выполняется методом наименьших квадратов. Для модели М2 и М3 параметры  $s, \gamma, m_1$  и  $m_2$  подбирались “вручную” так, чтобы разница между экспериментальными и расчетными значениями была минимальной (рис. 5).

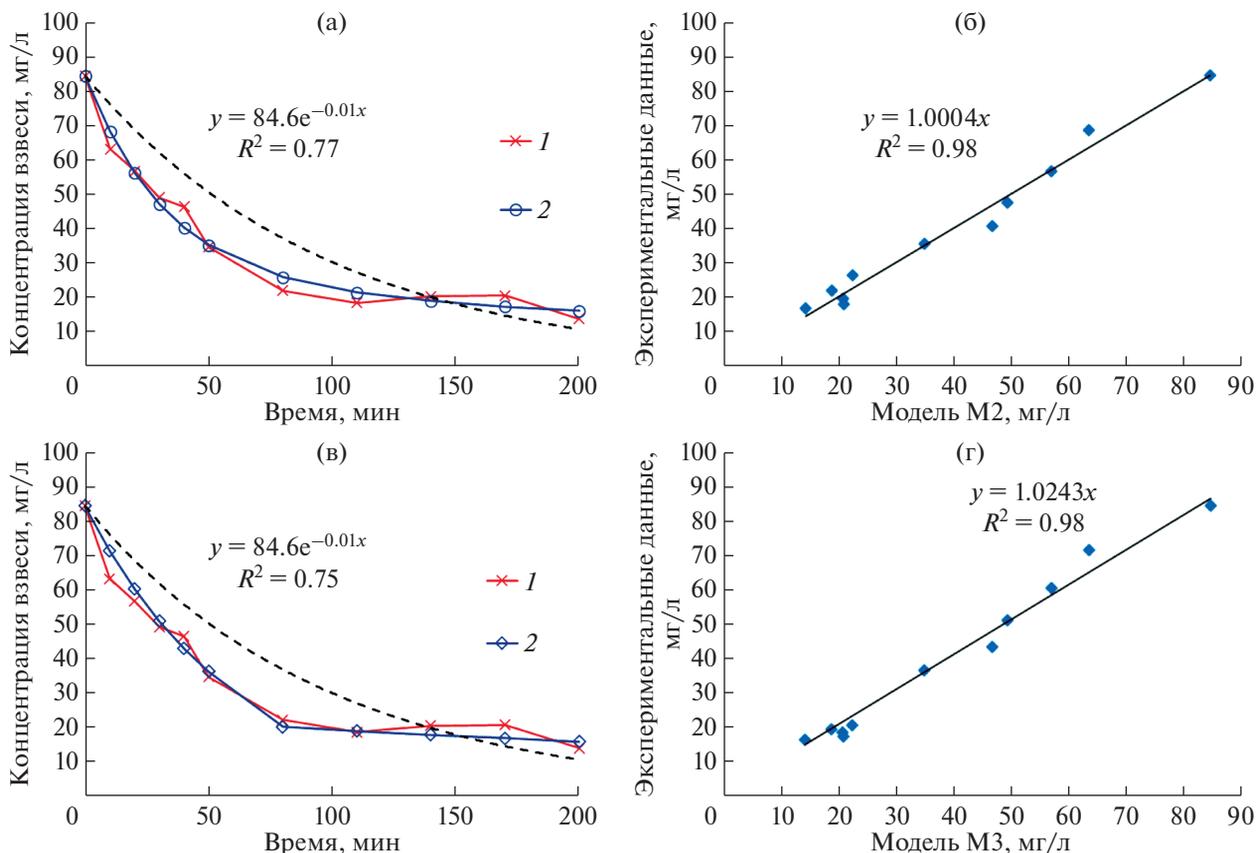
Всего на втором этапе было выполнено 6 экспериментов (два в первой серии и четыре во второй). Содержание вносимой взвеси подбиралось таким образом, чтобы начальная концентрация взвешенного вещества в сосуде была максимально приближена к реальным условиям исследуемой области (среднее значение составило 90 мг/л). Для второй серии на этом этапе удалось после предварительной обработки пробы (см. раздел “Материалы и методы исследований”) получить взвесь с преобладанием пелитовой фракции (табл. 1). Итоговый результат представлен в виде графика, на котором изображены средние (и разброс) по всем экспериментам значения доли осевшей взвеси из верхнего слоя толщиной 1.5 см после 30 мин после его начала (рис. 6).



**Рис. 4.** Динамика взвеси на первом этапе экспериментов. (а) – Водопроводная вода, (б) – вода с содержанием солей 35 г/л, 1 – объем вносимой суспензии 1.5 мл; 2 – 7.5 мл, 3 – 15 мл. Пунктирная линия – аппроксимация эксперимента моделью М1 с внесением 1.5 мл суспензии. (в) – Доля осевшей взвеси после 30 мин. от начала эксперимента. 1 – в водопроводной воде, 2 – в воде с содержанием солей 35 г/л.

Экспериментальные данные позволяют сделать вывод об увеличении скорости осаждения взвеси в интервале солёности 2–3 г/л с последующим спадом в воде с солёностью более 5 г/л.

Одной из возможных причин этого может быть увеличение размера оседающих частиц (с пелитовой до мелко- и крупноалевритовой размерности). При этом укрупняется примерно 70%



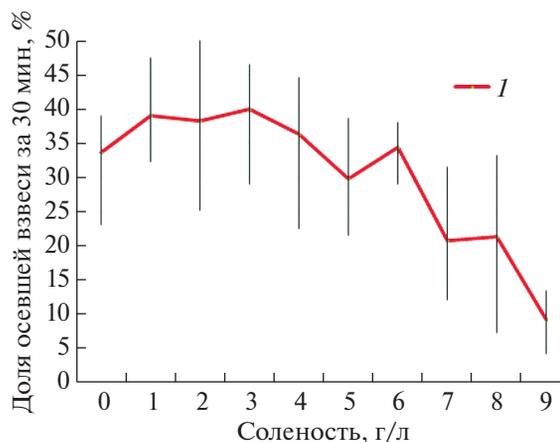
**Рис. 5.** Иллюстрация приближения экспериментальных данных с помощью трех моделей. (а, в) – Изменение концентрации взвеси (1) в верхнем (1.5 см) слое экспериментального сосуда со временем при внесении суспензии в воду соленостью 3 г/л и ее приближение: моделью М1 (пунктирная линия), 2 – с помощью модели М2, при  $\gamma = 29\%$ ,  $m_1 = 2$  1/тыс. мин,  $m_2 = 30$  1/тыс. мин, 3 – с помощью модели М3, при  $s = 187$  1/тыс. мин,  $m_1 = 2$  1/тыс. мин;  $m_2 = 30$  1/тыс. мин. (б, г) – Диаграммы соответствия между экспериментальными данными и моделями М2 и М3 соответственно.

внесенной в воду взвеси, а скорость осаждения увеличивается примерно в 10–15 раз.

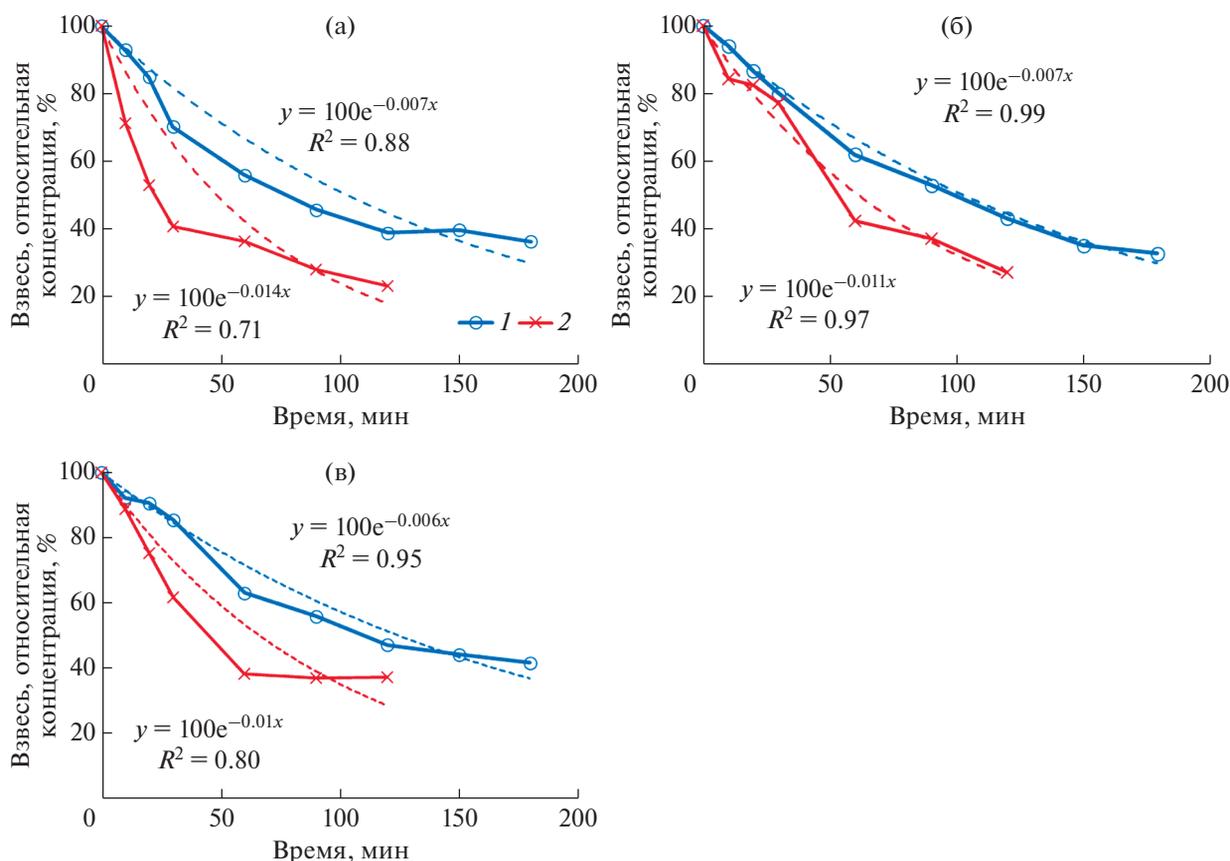
Осаждение частиц, как с однородным гранулометрическим составом, так и со смешанным, имеет схожий характер, даже при условии трехкратной разницы в концентрациях взвеси. Полученные результаты дают основание полагать, что размерный состав частиц является важным, но не определяющим фактором, который влияет на скорость осветления.

**Этап 3.** Для определения роли биогенного материала в осаждении взвеси нами был проведен третий этап эксперимента (рис. 7), в котором использовалось взвешенное вещество, состоящее преимущественно из частиц пелитовой размерности (табл. 1).

Содержание органического вещества в суспензии составило 4.16%. Эксперимент проводился дважды: до сжигания органики и после, используя оставшуюся взвесь. Ход проведения



**Рис. 6.** Доля осевшей взвеси (после первых 30 мин эксперимента) при разной солености, характерной для устьевой области р. Дон и Таганрогского залива. 1 – среднее значение из всех экспериментов, вертикальная линия – размах от максимального до минимального значения.



**Рис. 7.** Изменение концентрации взвеси со временем в эксперименте с наличием органического вещества в суспензии (2) и без, после сжигания (1). Пунктиром обозначено приближение моделью М1. (а) – Водопроводная вода, (б) – вода с содержанием солей 5 г/л, (в) – вода с содержанием солей 9 г/л.

эксперимента оставался таким же, как и на предыдущих этапах для трех сред – водопроводной воды и воды с соленостью 5 и 9 г/л. В целом, для серии экспериментов с минеральной взвесью (после сжигания органического вещества) эмпирические данные были наиболее приближены к теоретической кривой, соответствующей модели М1 (рис. 7), что говорит о практически неизменной скорости оседания частиц в период эксперимента. Это, в свою очередь, может указывать на отсутствие каких-либо еще дополнительных процессов, влияющих на простое механическое оседание. В частности, для минеральной (без органической компоненты) взвеси также наблюдается отсутствие влияния солености на скорость оседания. Взвесь с органическим веществом оседает быстрее (рис. 7), чем частицы без органического вещества, а также скорость оседания выше для всех сред более чем в 2 раза.

## ВЫВОДЫ

1. Лабораторные эксперименты показали явное влияние солености на скорость оседания

частиц. Максимальная скорость оседания наблюдалась в диапазоне 1–4‰, довольно резко уменьшаясь после 5‰. При этом основным процессом увеличения скорости оседания взвеси является укрупнение частиц пелитовой размерности (однако это явным образом не доказано из-за отсутствия в нашем распоряжении оборудования для контроля гранулометрического состава взвеси в ходе эксперимента).

2. Мы убедились, что концентрация взвеси определяет скорость оседания как в пресной, так и в соленой воде, при этом в соленой воде скорость оседания выше.

3. И наконец, мы показали, что ускоренное оседание взвеси может быть связано напрямую с наличием органического вещества в пробе.

4. Необходимо учитывать многие присущие эксперименту ограничения. Они связаны как с простотой используемого оборудования для оценки мутности воды в ходе экспериментов, так и с неизбежными погрешностями из-за большого числа манипуляций.

Вместе с тем мы получили количественные оценки скоростей осаждения природной взвеси при ее перемещении от устья Дона к морю в Таганрогском заливе.

**Источники финансирования.** Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гр. проекта 01201363188 и АААА-А19-119040390084-3.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреева И.А., Лапина Н.Н.* Методика гранулометрического анализа донных осадков Мирового океана и геологическая интерпретация результатов лабораторного изучения вещественного состава осадков. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1998. 45 с.
2. *Бронфман А.М., Хлебников Е.П.* Азовское море: основы реконструкции. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 271 с.
3. ГОСТ 26213-91 Почвы. Методы определения органического вещества. М.: Издательство стандартов, 1992.
4. *Клещенков А.В.* Особенности твердого стока р. Дон в современный маловодный период // Сб. докл. междунар. науч. конф. "Третьи Виноградские чтения. Грани гидрологии". Санкт-Петербург, 28–30 марта 2018 г. / Под ред. Макарьева О.М. СПб.: Научное издание, 2018. С. 591–594.
5. *Коченкова А.И., Новигатский А.Н., Гордеев В.В.* Распределение взвеси в маргинальном фильтре Северной Двины в конце лета // Успехи современного естествознания. 2018. № 2. С. 106–112.
6. *Кравчишина М.Д., Ключиткин А.А., Паутова Л.А. и др.* Хлорофилл "а" во взвеси Каспийского моря как показатель условий биогенной седиментации // Докл. РАН. 2015. Т. 465. № 3. С. 357–362.
7. *Купцов В.М., Лисицын А.П.* Влажность, объемный вес и потоки осадочного вещества в донных отложениях моря Лаптевых // Океанология. 2003. Т. 43. № 1. С. 127–133.
8. *Лисицын А. П.* Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
9. *Лисицын А.П.* Лавинная седиментация // Лавинная седиментация в океане. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 1982. С. 3–59.
10. *Лисицын А.П., Ключиткин А.А., Буренков В.И. и др.* Распределение и состав взвешенного осадочного вещества на меридиональных разрезах в Атлантическом океане: прямые определения и спутниковые данные // Докл. РАН. 2016. Т. 466. № 2. С. 221–224.
11. *Лукашин В.Н., Кравчишина М.Д., Ключиткин А.А. и др.* Геохимия взвешенного вещества в маргинальном фильтре реки Волги // Океанология. 2019. Т. 59. № 3. С. 424–432.
12. *Матишов Г.Г., Григоренко К.С., Московец А.Ю.* Механизмы осолонения Таганрогского залива в условиях экстремально низкого стока Дона // Наука Юга России. 2017. Т. 13. № 1. С. 35–43.
13. *Матишов Г.Г., Пряхина Г.В., Федорова И.В., Сорокина В.В.* Современный сток воды и наносов в дельте реки Дон (по результатам экспедиционных исследований) // Вестник ЮНЦ. 2008. Т. 4. № 3. С. 72–77.
14. *Петелин В.П.* Гранулометрический анализ морских донных осадков: монография. М.: Наука, 1967. 265 с.
15. РД 52.24.468-2005 Взвешенные вещества и общее содержание примесей в водах. Методика выполнения измерений массовой концентрации гравиметрическим методом.
16. *Сорокина В.В.* Особенности терригенного осадконакопления в Азовском море во второй половине XX века. Дис. ... канд. географ. наук: 25.00.28. Ростов-на-Дону, 2006. 216 с.
17. *Сорокина В.В., Ивлиева О.В., Лурье П.М.* Динамика стока на устьевых участках рек Дон и Кубань во второй половине XX века // Вестник ЮНЦ. 2006. Т. 2. № 2. С. 58–67.
18. *Сорокина В.В., Бердников С.В.* Математическое моделирование терригенного осадконакопления в Азовском море // Океанология. 2008. Т. 48. № 3. С. 456–466.
19. *Сорокина В.В., Бердников С.В.* Биогенная нагрузка Дона и Кубани на экосистему Азовского моря // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 6. С. 670–684.
20. *Хрусталева Ю.П.* Основные проблемы геохимии седиментогенеза в Азовском море. Апатиты: Кольский научный центр, 1999. 247 с.
21. *Eisma D.* Flocculation and de-flocculation of suspended matter in estuaries // Neth. J. Sea Res. 1986. V. 20. P. 183–199.
22. *Gibbs R.J., Tshudy D.M., Konwar L., Martin J-M.* Coagulation and transport of sediments in the Gironde Estuary // Sedimentology. 1989. V. 36. P. 987–999.
23. *Kranck K.* Particulate matter grain-size characteristics and flocculation in a partially mixed estuary // Sedimentology. 1981. V. 28. P. 107–114.
24. *Mhashhas A., Bettina B-E, Shunqi P.* Effect of hydrodynamics factors on sediment flocculation processes in estuaries // J. Soils Sediments. 2018. V. 18(10). P. 3094–3103.
25. *Portela L.I., Ramos S., Trigo-Teixeira A.* Effect of salinity on the settling velocity of fine sediments of a harbour basin // J. Coastal Res., Spec. Issue. 2013. № 65. P. 1188–1193.
26. *Schwarzer K., Nguyen C.Th., Ricklefs K.* Sediment re-deposition in the mangrove environment of Can Gio, Saigon River estuary (Vietnam) // J. Coastal Res., Spec. Issue. 2016. № 75. P. 138–142.
27. *Van Leussen W.* The variability of settling velocities of suspended fine-grained sediment in the Ems estuary // J. Sea Res. 1999. V. 41. P. 109–118.
28. *Verney R., Lafite R., Brun-Cottan J.* Flocculation Potential of Estuarine Particles: The Importance of Environmental Factors and of the Spatial and Seasonal Variability of Suspended Particulate Matter. Estuaries and coasts // J. of the Estuarine Research Federation. 2009. V. 32. № 4. P. 678–693.

## Experimental Estimation of the Deposition Rate of Water Suspended Matter in the Mouth of the Don River and in Taganrog Bay

V. S. Gerasyuk<sup>a</sup>, S. V. Berdnikov<sup>a, #</sup>

<sup>a</sup>*Federal Research Centre the Southern Scientific Centre RAS, Rostov-on-Don, Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: berdnikovsv@yandex.ru*

An experimental determination was carried out concerning the influence of salinity and other controlling factors (concentration of suspended matter, organic material) on the sedimentation rate of particles of pelitic and aleuritic size in the mouth area of the Don River and in Taganrog Bay. In laboratory setting, the change in the concentration of suspended matter in fresh and salt water was studied after adding of suspension of particles from bottom sediment samples taken in the Don River delta. Live samples contained particles of aleuritic size (0.1–0.01 mm), pelitic size (0.01–0.001 mm) as well as subcolloidal fraction (<0.001 mm). For explanation of experimentally observed dynamics of water clarification as a result of suspension sedimentation, three models were proposed: 1) the suspension is uniform-size, sedimentation rate does not change eventually; 2) the suspension is inhomogeneous in size and consists of two size groups of particles with different sedimentation rates (in particular, it is assumed that the process of suspension coarsening (analogue to coagulation, flocculation) occurs “instantly” during the first minutes of the experiment); 3) the process of suspension coarsening occurs not instantly, but within the first 20 minutes after the suspension enters the environment, then the suspension begins to settle. It is shown that the second and third models satisfy the experimental data. In this case, the sedimentation rate increases with the growth of suspended matter concentration after the introduction of the suspension, both in fresh and in the marine environment. The maximum sedimentation rate of pelitic particles is observed in the salinity range of 2–4 g/L. After removal of organic material from the suspension, the sedimentation rate reduced by more than 2 times in the salinity range of 0–9 g/L.

**Keywords:** experimental research, suspended matter, sedimentation rate, estuary, salinity, Taganrog Bay, the mouth of the Don River