

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

УДК 551.501:629.78

**ДИСТАНЦИОННАЯ ИНДИКАЦИЯ АНТРОПОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ
НА МОРСКУЮ СРЕДУ, ВЫЗВАННЫХ ЗАГЛУБЛЕННЫМИ СТОКАМИ:
МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЭКСПЕРИМЕНТЫ**

© 2001 г. В. Г. Бондур*, Ю. В. Гребенюк

*Центральный научно-исследовательский институт “Комета”, Москва

*Тел.: (095) 277-42-31; e-mail: vgbondur@online.ru

Поступила в редакцию 21.05.2001 г.

Проводится анализ физических процессов, происходящих при воздействии заглубленной струи сточных вод на морскую среду и поверхность, с целью построения комплексной математической модели этих процессов. Рассматривается обобщенная схема комплексной модели, дающей достаточно полное количественное описание указанного явления и позволяющей получать количественные характеристики изменений различных параметров водной среды, а также оценивать влияние заглубленных сбросов на прибрежные экосистемы. Делаются оценки возмущений морской среды и поверхности под действием заглубленных стоков, свидетельствующие о возможности индикации этих возмущений средствами дистанционного зондирования. Осуществляется сравнение модельных оценок поверхностных возмущений с экспериментальными данными, полученными с помощью радиолокационной и оптической аппаратуры, установленной на борту космических аппаратов, самолетов, вертолетов и на морской гидрофизической платформе.

ВВЕДЕНИЕ

Важной сферой применения методов дистанционного зондирования (ДЗ) океана с борта аэрокосмических носителей является мониторинг загрязнений прибрежных акваторий, которые подвержены интенсивным антропогенным воздействиям [1–6]. Один из наиболее распространенных источников антропогенного влияния на эти области – заглубленные сбросы сточных вод [3, 7, 8]. Эффективным методом исследования таких процессов является также математическое моделирование, позволяющее получать количественные характеристики изменений различных параметров водной среды и оценивать влияние заглубленных сбросов на прибрежные экосистемы [5, 6, 9–12].

К определяющим физическим механизмам воздействия такого явления на водную среду относятся: механический перенос загрязняющих примесей движущимися водами и гидродинамическое воздействие заглубленных стоков на морскую среду и поверхность [8–11, 13–16]. Перенос примесей, обусловленный средней скоростью течений (адвекцией) и диффузией, достаточно хорошо изучен в теоретическом и экспериментальном плане, что явилось основой для создания ряда математических моделей расчета поля концентрации загрязняющих веществ, поступающих в океан со сточными водами [8, 10, 17]. Менее изучены механизмы гидродинамического воздействия заглубленных струй на морскую среду и поверхность. В настоящей работе основное внимание уделяется разработке подходов к построению комплекс-

ной математической модели, описывающей явление в целом, оценкам возмущений морской поверхности, связанных с различными проявлениями глубинных стоков, а также сравнение их результатов с экспериментальными данными, полученными с борта аэрокосмических носителей и с гидрофизической платформы с помощью радиолокационной (РЛ) и оптической аппаратуры.

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ
ПРОЦЕССОВ, СВЯЗАННЫХ
С ЗАГЛУБЛЕННЫМИ СТОКАМИ,
ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ВОЗМОЖНОСТИ
ИХ ДИСТАНЦИОННОЙ ИНДИКАЦИИ**

Сброс сточных вод в море обычно производится из непрерывно действующего источника, расположенного в придонном слое. Сбросные устройства могут иметь различную конструкцию, но все они в результате своего действия создают в морской среде турбулентную струю или ряд струй, плотность которых отличается от плотности воды на горизонте источника [3, 8, 14]. Поскольку обычно сбрасывается пресная вода, содержащая различные примеси, то ее начальная плотность, как правило, меньше плотности среды и струя будет всплывающей. Основными начальными параметрами турбулентной струи являются расход Q (количество жидкости, проходящей через поперечное сечение струи за единицу времени), импульс или количество движения (произведение расхода струи на ее скорость) и разность

плотностей воды $\Delta\rho$ в струе ρ и в море ρ_0 на горизонте источника, определяющая вместе с расходом запас плавучести струи [10, 18]:

$$F = g\Delta\rho Q/\rho_0, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения.

При распространении турбулентной струи ее расход возрастает вследствие вовлечения в движение окружающих вод. Когда среда однородна по плотности и разность плотностей среды и струи равна нулю, при распространении струи сохраняется ее импульс. В противном случае сохраняется только горизонтальная компонента импульса, тогда как вертикальная изменяется под действием сил плавучести. Если среда однородна по плотности, а ее плотность не равна плотности струи, то при распространении струи сохраняется запас плавучести (при условии линейности уравнения состояния воды) и она всплывает на поверхность [11, 12].

Главной задачей, которая ставится при сбросах вод в прибрежные акватории, является стремление “захоронить” стоки в нижних слоях, не позволяя им выйти в поверхностный слой и загрязнить его. Поэтому сбросные устройства устанавливаются, как правило, в районах, где наблюдается устойчивая стратификация [8].

Если рассмотреть жидкий (лагранжев) элемент всплывающей струи в устойчиво стратифицированной среде, то из-за перемешивания с окружающими водами его плотность будет повышаться, а плотность окружающей воды – понижаться (элемент всплывает), и на некотором горизонте разность плотностей обратится в нуль – струя перестанет всплывать [10, 11, 13, 14, 16, 18].

Для удобства описания процессов распространения струй обычно их разбивают на две фазы: активную и пассивную [10, 13].

Активная фаза

Под активной фазой подразумевают участок струи от источника до того места, где уровень турбулентности (турбулентных пульсаций скорости) в струе перестанет существенно отличаться от фонового, характерного для морской среды (при отсутствии струи).

Рассмотрим несколько подробнее гидродинамические процессы, протекающие на активной и пассивной фазах.

Из соображений подобия и размерностей можно установить, что в устойчиво стратифицированной среде продолжительность активной фазы t_0 (время прохождения жидкого элемента струи от источника до того места, где турбулентность в струе вырождается до уровней, сравнимых с фоновыми) определяется характерным временем свободных колебаний и условно может быть оце-

нена как половина периода Вьяйсяля–Брента T [10, 13, 14, 19]:

$$t_0 = T/2 = \pi \left[(g/\rho_0) \frac{\partial \rho}{\partial z} \right]^{-1/2}, \quad (2)$$

Если рассмотреть сечение струи с горизонтальным или наклонным пуском, то первоначально ее осесимметричное сечение со временем перестанет быть таковым, поскольку вследствие подавления турбулентности стратификацией горизонтальный размер сечения будет расти быстрее, чем вертикальный. Однако на активной фазе этим эффектом можно пренебречь и считать струю осесимметричной. Поперечный размер струи на активной фазе растет линейно с удалением от источника, т.е. сечение струи остается таким же, каким оно было бы в однородной среде. Отметим, что рассмотрение чисто вертикальных струй лишено практического смысла, поскольку в море всегда есть течения.

Время всплывания струи, как показывают аналитические и численные расчеты, равно половине периода T [10, 19]. Таким образом, к концу активной фазы всплывание струи прекращается и ее дальнейшее распространение происходит примерно на одном горизонте. Далее струя совершает лишь затухающие колебания относительно того горизонта, на котором она оказалась в конце активной фазы.

Существуют модели [13, 18], позволяющие рассчитать важнейшие характеристики струи в конце активной фазы: высоту или горизонт всплывания; степень разбавления сточных вод; разности температур и соленостей между струей и окружающей водой. Последняя характеристика существенна только в морской среде, где вертикальное распределение плотности определяется как температурой, так и соленостью. При распространении струи пресной воды в пресноводном бассейне прекращение ее всплывания происходит при достижении струей плотности, равной плотности окружающих вод, что автоматически означает достижение равенства температур струи и среды. В морской воде появляется возможность совпадения плотностей струи и среды при сохранении различий по температуре и солености. При этом достигаемая к началу пассивной фазы разность температуры и солености может быть как положительной, так и отрицательной – в зависимости от начальных параметров струи и термохалинной стратификации среды.

На всплывание струи существенное влияние может оказать эффект уплотнения морских вод при смешении, связанный с особенностями нелинейного уравнения состояния воды [11, 13, 17]. Этот эффект особенно важен при низких температурах для водоемов с низкой соленостью, где

его игнорирование способно повлечь за собой не только количественные, но и качественные ошибки, возникшие в результатах расчетов.

Пассивная фаза

В этой фазе струя характеризуется следующими свойствами и гидродинамическими процессами [10–14, 19]. Поперечное сечение струи становится существенно неосесимметричным. Турбулентное вовлечение прекращается. Рост вертикального размера практически не происходит и даже может уменьшаться из-за явления коллапса. Горизонтальный размер растет, в частности, благодаря процессу коллапса. Поскольку струя продолжает отличаться по температуре и солености от окружающей воды на тех же горизонтах, то на боковых границах струи может развиваться термохалинная неустойчивость Стерна, приводящая к ее интрузионному расслоению [13, 20]. При этом струя образует по вертикали своеобразный “слоеный пирог” и уже не существует как единое целое. Интрузионное расслоение способствует росту горизонтального размера области, занятой разбавленными сточными водами.

Так как струя продолжает обладать термохалинной аномалией, скомпенсированной в поле плотности, на ее верхней и нижней границах могут развиваться конвективные процессы двойной диффузии типа “солевых пальцев” (на той границе, где температура и соленость убывают с глубиной) и послойной конвекции (где температура и соленость растут с глубиной) [14–16, 19–21]. Конвективные процессы двойной диффузии могут интенсифицировать вертикальный обмен более чем на порядок, способствуя дальнейшему разбавлению сбрасываемых вод [10, 18]. Будучи пассивной, струя переносится течениями, примесь рассеивается благодаря горизонтальной диффузии. Горизонтальный размер области, занятой примесью, увеличивается в результате комбинированного действия вертикального сдвига (градиента) скорости течений и вертикальной диффузии (так называемая диффузия со сдвигом скорости). Происходит сепарация взвесей, входящих в состав стоков. Взвешенные вещества, плотность которых меньше (больше) плотности воды, всплывают (тонут) относительно положения струи сточных вод и могут достигать поверхности (дна) моря. Зная гидравлическую крупность взвеси, расстояние от горизонта всплывания струи до поверхности (дна) моря, степень разбавления в конце активной фазы и эффективный коэффициент горизонтальной диффузии, можно оценить время достижения взвесью поверхности (дна) моря, ареал загрязнения и концентрацию загрязняющих веществ. Процесс сепарации несущественен на активной фазе вследствие ее непродолжительности (первые десятки минут) [10, 12, 19].

При глубинных сбросах ниже уровня термоклина происходят турбулизация нижней границы скачка плотности, образование вихревых структур, генерация внутренних волн и связанных с ними полей течений, формирование конвективных движений, обусловленных опреснением нижнего слоя среды (солевые пальцы) [14–16, 19–21].

Возможности дистанционной индикации

Описанные выше процессы вызывают изменение различных параметров морской среды, дистанционная регистрация которых обеспечивает возможность оперативного выявления и определения количественных характеристик различных явлений, сопровождающих глубинные стоки, с аэрокосмических носителей [5, 6, 22–28].

Эти процессы приводят к деформации поверхности при непосредственном взаимодействии со всплывающей струей, а также к генерации поверхностных волн всплывающими вихревыми структурами. Кроме того, происходит искажение пространственно-временной структуры волнения внутренними волнами и пленками поверхностно-активных веществ (ПАВ) [22–27, 29–31]. Для регистрации таких искажений могут использоваться оптические и РЛ-средства, установленные на аэрокосмических платформах [5, 6, 22–24].

Под воздействием глубинных стоков происходит также изменение гидрооптических характеристик морской воды, которое проявляется в увеличении ее мутности за счет увеличения рассеяния и поглощения света вследствие повышения концентрации взвешенных и растворенных органических веществ [6, 17, 28]. Для обнаружения таких явлений возможно использование как пассивных (спектральная, многоспектральная, гиперспектральная съемка), так и активных (лидарных) оптических методов [5, 6, 22, 24, 28].

Кроме того, в области глубинных стоков происходит изменение физико-химических характеристик морской среды, которое проявляется в увеличении содержания растворенных органических веществ, фосфора и азота, тяжелых металлов, растворенного кислорода, а также в изменении температуры и солености морской воды. При длительном воздействии этих процессов возможно повышение концентрации фитопланктона, приводящее к изменению спектральных характеристик сигналов флуоресценции. Эти эффекты также могут быть индцированы различными дистанционными методами. Например, содержание растворенных органических веществ можно измерить с помощью лидаров путем анализа спектров комбинационного рассеяния и флуоресценции, возбуждаемых лазерным излучением [6, 28]. Для измерения остальных физико-химических параметров среды могут использоваться лазерно-

искровой метод, метод лазерной корреляционной спектроскопии и др. [6, 28]. Для регистрации изменений температуры могут применяться ИК- и пассивные мкв-методы зондирования [5, 6, 22, 24].

Для определения эффективности применения дистанционных методов при мониторинге антропогенных воздействий в области глубинных стоков необходимо произвести экспериментальные исследования, а также сделать теоретические оценки проявлений различных возмущений, связанных с этим явлением.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ МОРСКОЙ СРЕДЫ, ВЫЗВАННЫХ ЗАГЛУБЛЕННЫМИ СТОКАМИ

Как уже упоминалось, глубинные стоки оказывают существенное воздействие на водную среду за счет широкого спектра присущих им процессов и явлений. В настоящее время разработан ряд математических моделей, позволяющих получить количественные оценки воздействий отдельных физических механизмов на характеристики морской среды и ее поверхности [8, 10–16, 30–32]. Однако модели, учитывающей совместное действие этих механизмов, не существует. Кроме того, упомянутые модели не учитывают влияние рассматриваемых процессов на экосистемы прибрежных вод и не позволяют оценить воздействие глубинных стоков на характеристики среды, которые могут быть зарегистрированы дистанционными методами.

На рис. 1 приведена обобщенная блок-схема комплексной модели, обеспечивающая достаточно полное количественное описание данного явления. В состав такой комплексной модели должны входить: гидродинамические модели возмущений среды струями сточных вод (блок А); гидротермодинамические модели (блок Б); модели переноса примесей (блок В); гидрооптические модели (блок Г); модель источника загрязнения среды (модуль 16); гидрометеорологическая модель района (модуль 17). Эти модели являются входными для математической модели экосистемы прибрежных вод [6]. Отдельные модели обеспечивают получение оценок возмущений среды и поверхности, вызываемых различными механизмами в процессе глубинных сбросов вод.

Гидродинамические модели (блок А) позволяют провести оценки воздействия на среду различных процессов, к которым относятся:

- всплывание струи примеси в условиях стратифицированной среды (расчет глубины всплывания струи, величины разбавления сточных вод, размер области, занимаемой сточными водами на некотором горизонте Z) – модуль 1;

- конвективные движения, обусловленные опреснением нижнего слоя среды, приводящие к образованию солевых пальцев – модуль 2;

- турбулизации слоя скачка плотности (определение величины деформации слоя скачка плотности в зависимости от его параметров и характеристик воздействующего потока жидкости) – модуль 3;

- образование турбулентности и крупных вихревых структур (расчет размеров вихрей, скоростей всплывания и горизонтов их подъема) – модуль 4;

- генерация внутренних волн, возбуждаемых глубоководным выбросом сточных вод ниже слоя термоклина – модуль 5 (оценка амплитуд внутренних волн и скоростей вызываемых ими течений).

Гидротермодинамические модели (блок Б) обеспечивают расчет полей течений и температуры в исследуемой акватории. Такие поля могут быть получены как на основании климатических моделей, результатов натуральных экспериментов [6], так и на основании численных экспериментов с математической моделью, описываемой уравнениями Навье–Стокса с учетом плотностной стратификации и параметра Кориолиса (классическая модель гидротермодинамики – модуль 10) [9, 17, 29, 33]. Кроме этого может использоваться модель, учитывающая случайное поле ветра (модуль 11) [34].

С помощью блока В комплексной модели (рис.1) проводится расчет переноса загрязнений в морской среде (модуль 12) и на ее поверхности (модуль 13) под воздействием ветра, различного рода течений и турбулентной диффузии примеси [8–10, 33]. Модели позволяют рассчитать концентрации полей загрязнения морской среды, размеры области загрязнения и направление ее смещения под действием различных факторов, а также получить количественные оценки изменения параметров среды при естественных или антропогенных воздействиях и определить вероятностный ход развития ситуации на обозримое будущее (краткосрочный или долгосрочный прогноз).

Гидрооптические модели (блок Г) должны обеспечить расчет соответствующих характеристик морской среды и их изменение под действием струй заглубленных стоков (модуль 14), а также расчет спектральных (цветовых) характеристик поверхности вне и внутри зоны выхода возмущений, связанных с глубинными стоками (модуль 15).

Входными данными для такой комплексной модели являются данные о параметрах сбросового устройства и гидрометеорологических характеристиках среды в районе сброса сточных вод (модули 16 и 17).

Для проведения модельных расчетов необходимы следующие характеристики стока: расход жидкости, скорость истечения, длина диффузора,



Рис. 1. Блок-схема комплексной математической модели возмущений морской среды струями сточных вод.

глубина его расположения и удаление от берега, количество отверстий диффузора и их размер, температура, плотность и химический состав сбрасываемых вод. Для района расположения сбросового устройства необходимы сведения о следующих характеристиках среды: топографии прибрежного района, вертикальной стратификации океанских вод (глубине термоклина и величине градиента плотности), сезонной изменчивости характеристик термоклина, направлении и скорости течений, температуре и плотности океанских вод и др.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ЗАГРЯЗНЕНИЙ В МОРСКОЙ СРЕДЕ

Исследования распространения примесей в водной среде в абсолютном большинстве случаев строится на решении систем дифференциальных или интегрально-дифференциальных уравнений сплошной жидкой среды [8–10, 17]. При этом практически всегда используется допущение о том, что примесь динамически консервативна, т.е. не меняет динамику движения среды. Исключения из этого правила, например для расчетов

нефтяных разливов, перемещения льда и т.п., не нарушают общего правила. В необходимых случаях во внимание принимается переменность средней объемной плотности среды в связи с наличием примеси и делается это в форме общих “уравнений состояния” для жидкости.

Выводов и интерпретаций рабочих уравнений для разных случаев известно множество, однако все они приводят к однотипным практическим результатам. В качестве исходных уравнений для решения задач распространения примесей обычно используются следующие уравнения [9–12, 17, 33–37]:

сохранения массы (уравнение “неразрывности”)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j) = \Delta q; \quad (3)$$

Рейнольдса (осредненные уравнения Навье–Стокса)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial(U_i U_j)}{\partial x_j} + 2W_{ij}U_j = \\ & = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[n_{T_{ij}} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} d_{ij} K \right] + \Delta k; \end{aligned} \quad (4)$$

переноса

$$\frac{\partial(\rho S)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho S U_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D_{sj} \frac{\partial S}{\partial x_j} \right) + \Delta S, \quad (5)$$

“состояния” жидкости

$$\rho = \rho(T, S, P) \quad (6)$$

“замыкающие” соотношения для v_T , k , Ds , вытекающие из теории или эксперимента.

В формулах (3)–(5) по повторяющимся в одночленных выражениях индексам предполагается суммирование. Например: $\partial/\partial x_j(\rho U_j)$, где $j = 1, 2, 3$. Выражение для дивергенции принимает вид

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\rho \mathbf{U}) & \equiv \rho \operatorname{div} \mathbf{U} + \mathbf{U} \operatorname{grad} \rho \equiv \\ & \equiv \frac{\partial(\rho U_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\rho U_2)}{\partial x_2} + \frac{\partial(\rho U_3)}{\partial x_3} \equiv \\ & \equiv \rho \left\{ \frac{\partial U_1}{\partial x_1} + \frac{\partial U_2}{\partial x_2} + \frac{\partial U_3}{\partial x_3} \right\} + \left\{ U_1 \frac{\partial \rho}{\partial x_1} + U_2 \frac{\partial \rho}{\partial x_2} + U_3 \frac{\partial \rho}{\partial x_3} \right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

В выражениях (3)–(7) приняты следующие обозначения: x_1, x_2 и x_3 – декартовы координаты; \mathbf{U} – вектор скорости с компонентами U_1, U_2 и U_3 ; ρ – объемная плотность жидкости с примесями, определяемая по (4) и (6); t – время; P – давление; g – ускорение свободного падения; $v_{T_{ij}}$ – “эффективная вязкость”; K – кинетическая энергия турбулентности; S – переносимая течением субстанция, в качестве которой может выступать любая

консервативная примесь, включая наносы, соленость воды, теплоту, “рейнольдсовы” напряжения, кинетическую энергию турбулентности и т.д.; Δs – внешний приток (отток) переносимой примеси в единицу времени, включая скорость ее продуцирования или разложения (диссипации); D_{sj} – коэффициент диффузии рассматриваемой примеси; $\Delta q, \Delta k$ – внешние притоки (оттоки) массы жидкости, включая осадки и испарение.

Указанные дифференциальные уравнения и их многочисленные частные случаи подробно исследованы, включая условия существования и единственности решений для конкретных краевых задач. Это открывает широкие возможности для их практического использования. Уравнение (4) существенно нелинейно, что обычно является главной трудностью при решениях.

Практически значимые результаты получают только путем осреднения исходных уравнений по некоторому, хотя бы и достаточно малому, пространственно-временному объему ($\Delta \equiv [\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \Delta t]$), с соблюдением “правил осреднения Рейнольдса”, подробно анализируемых, например в [33]. При этом форма записи линейных уравнений (3) и (6) остается неизменной, а нелинейного уравнения Навье–Стокса меняется: оно превращается в уравнение Рейнольдса (6), причем возникает заранее неизвестный тензор $v_{T_{ij}}$. Только в виде (4) уравнения Навье–Стокса реально используются для практических решений.

Для решения задачи переноса загрязнений в морской среде с вертикально-неоднородной структурой течений обычно используют модели с приближенным описанием этих течений (двумерные, 275-мерные, многослойные и трехмерные) [10, 37]. Кроме этого используются также модели переноса с учетом молекулярной и турбулентной (обычно на много порядков превышающей молекулярную) диффузии, описываемые полуэмпирическими уравнениями [8, 10, 17, 37]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + U_1 \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + U_2 \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + U_3 \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \\ & = D_L \left(\frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где c – концентрация примеси; D_L и D_z – “горизонтальный” и “вертикальный” коэффициенты турбулентной диффузии соответственно.

Альтернативными дифференциальному описанию процессов диффузии являются методы прямого статистического моделирования, описывающие примесь дискретным набором лагранжевых или квазилагранжевых частиц, перемещающихся в пространстве по правилам, приведенным в [38]. Численная реализация описанных моделей

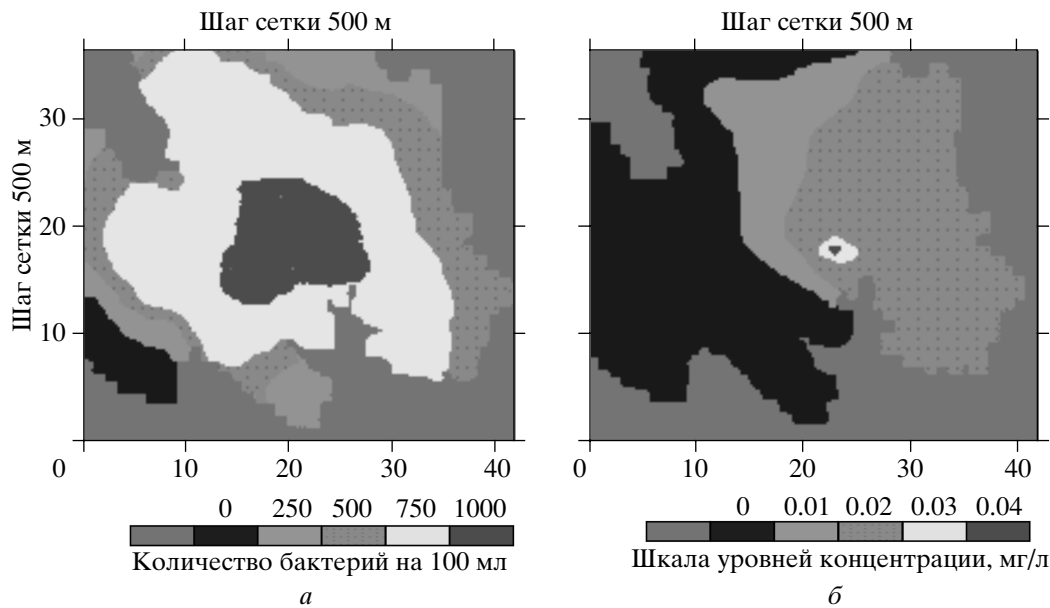


Рис. 2. Расчеты переноса загрязнений полиформ (а) и фосфорных соединений (б) в морской среде (Галлинского залива Балтийского моря).

обычно производится с использованием методов Эйлера и Лагранжа [12, 19, 39].

Для расчета максимального продольного L_x^{\max} и зависимости от продольной координаты поперечного $L_y(x)$ размеров пятна на поверхности, обусловленного стоком, получены формулы [10, 13]:

$$L_x^{\max} = \frac{Q}{L2\pi C_0(D_L D_z)^{\frac{1}{2}}}, \quad (9)$$

$$L_y(x) = \pm \left[\frac{D_L}{D_z} Z^2 - \left(\frac{4D_L x}{u} \ln \frac{2\pi L C_0 (D_L D_z)^{\frac{1}{2}}}{Q} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (10)$$

где L – длина диффузора; C_0 – уровень предельно допустимой концентрации; u – начальная скорость истечения струи; Z – вертикальная координата.

К отдельному классу относятся модели переноса загрязнений на морской поверхности. При этом обычно используются модели трех типов [8, 10, 30, 37, 39, 40].

Модели I типа связаны с описанием загрязнений поверхностно-активными веществами, образующими чрезвычайно тонкий слой на поверхности воды (обычно толщиной в несколько молекул). Концентрации подобного загрязнения очень низки. Динамика же таких слоев малоизучена, эффективные модели для ее описания отсутствуют.

Модели II типа относятся к распространению нефтяных загрязнений в морской среде, с

учетом таких физических процессов как: гидродинамическое растекание нефтепродуктов по поверхности моря; трансформация и перенос нефтепродуктов под воздействием ветра и течений; испарение нефтяных фракций из нефтяного slicka; образование эмульсии типа “нефть в воде”; изменение плотности нефтепродуктов и их фракционного состава; турбулентное рассеяние нефтяного загрязнения на поверхности моря; перенос и турбулентная диффузия нефтяного загрязнения в толще воды; взаимодействие с береговой линией и ледяным покровом.

Модели III типа описывают перенос химических веществ на поверхности и в толще воды. Они используются для оценки: дрейфа плавающих тел; дрейфа, растекания (распространения) и разложения нефтепродуктов и других плавающих жидкостей; переноса, распространения и эволюции растворимых веществ; погружения и распространения тяжелых химических веществ и объектов контейнерного типа; движения тяжелых объектов по морскому дну; дрейфа и распространения химических веществ из разрушенных объектов (поднимающиеся на поверхность или остающиеся на дне).

Программные реализации этих моделей содержат [37, 39, 40]: модули трекинга, используемые для моделирования траекторий движения различных типов сбросов; модули адвекции-дисперсии (диффузии), позволяющие рассчитывать концентрацию химических веществ, растворенных в воде, модуль химической трансформации веществ, описывающий такие процессы, как испарение, фотолиз, биodeградацию, химическое

окисление, гидролиз, адсорбцию (десорбцию) и седиментацию. Они применяются для моделирования сценариев сбросов загрязняющих веществ при чрезвычайных ситуациях, которые соответствуют принятию решений во время конкретных событий.

Разработанные математические модели позволяют проводить расчет переноса загрязнений в морской среде под действием ветра, различного рода течений и турбулентной диффузии примеси с учетом вертикальной структуры течений и плотностной стратификации вод, а также прогнозировать распространение загрязнений на достаточно длительные промежутки времени, оценивать размеры и концентрации полей загрязнения, анализировать возможные сценарии их распространения, оценивать последствия воздействия загрязняющих веществ на экологическую ситуацию среды. С помощью разработанных моделей проведены расчеты переноса загрязнений для различных районов Мирового океана, результаты которых показывают эффективность их использования для изучения различных антропогенных воздействий на прибрежные акватории.

На рис. 2 в качестве примера приведены результаты модельного расчета переноса загрязнений (*a* – перенос колиформ, *b* – фосфорных соединений) в Таллинском заливе Балтийского моря. Размер района моделирования 20 км × 20 км. Для оценки распространения загрязнений использовалась счетная сетка с шагом 500 м. В результате расчетов определялись концентрации колиформ (в количестве бактерий на 100 мл) и фосфорных соединений (в мг/л). Приведенный пример моделирования переноса загрязняющих примесей позволил определить размеры и концентрацию полей их распространения в Таллинском заливе, благодаря чему возможно оценить степень воздействия на экологическую обстановку в исследуемом районе [6, 34].

ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ ГЛУБИННЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Для моделирования всплывающей струи в стратифицированной среде (модуль 1 на рис. 1) используется система из семи обыкновенных дифференциальных уравнений, которая получается путем интегрирования уравнений неразрывности, движения, баланса тепла и соли по поперечному сечению струи, и уравнение состояния воды [14–16]. Система дифференциальных уравнений описывает всплывание осесимметричных и плоских струй в стратифицированной среде. Решение системы уравнений производится численным способом по схеме Рунге–Кутты четвертого порядка с переменным шагом интегрирования [14]. Модуль позволяет рассчитать траектории и глубины всплывания струй.

Механизмы образования и развития конвективных движений при заглубленных сбросах в морскую среду (модуль 2 на рис. 1) описываются системой из шести скалярных уравнений, получаемых из уравнений движения, теплопроводности, диффузии соли и неразрывности. Для решения этой задачи используется ряд допущений, которые существенно упрощают исходные уравнения и позволяют оценивать деформацию слоя скачка плотности [14, 16, 19–21].

Струя вод, вытекающая под скачком плотности, может приводить к турбулизации этого слоя и к его разрушению. Возмущения стратифицированного слоя приводят к образованию пятен перемешанной жидкости, которые постепенно схлопываются по вертикали и растекаются по горизонтали. Модель деформации слоя скачка плотности (модуль 3 на рис. 1) позволяет оценить величину отклонения границы раздела сред от равновесного состояния в сторону оси затопленной струи в зависимости от ее начальной скорости и расположения относительно скачка плотности [12, 16].

Модель образования турбулентного потока и вихревых структур (модуль 4) позволяет установить закон их развития и распространения в зависимости от значения числа Рейнольдса, размера вихря и его начальной скорости [14, 15].

Расчет амплитуд внутренних гравитационных волн, возбуждаемых заглубленными стоками (модуль 5), производится в приближении Буссинеска, при котором уравнение для вертикальной компоненты скорости U_z имеет вид [29]:

$$\frac{d^2}{dt^2} \Delta U_z + N^2(z) \Delta - U_z = 0, \quad (11)$$

где $\Delta = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2}$; $\Delta = \Delta + \frac{d^2}{dz^2}$; $N^2(z) = -\frac{g \delta \rho}{\rho_0 dz}$ – частота Вейселя–Брента; ρ_0 – среднее значение плотности; g – ускорение свободного падения.

Для случая гармонических плоских внутренних волн уравнение (11) принимает вид

$$U_z^2 = gk \frac{\delta \rho}{\rho_0} [\text{cth}(kh) + \text{cth}k(H-h)]^{-1}, \quad (12)$$

где k – волновое число; h – глубина расположения термоклина; H – глубина.

В модулях 6–9 вычисляются величины деформаций морской поверхности, вызываемых рассмотренными выше механизмами воздействия заглубленных стоков на морскую среду, что крайне важно для оценки возможностей их дистанционной индикации.

ОЦЕНКИ ВОЗМУЩЕНИЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗАГЛУБЛЕННЫМИ СТОКАМИ

Для оценок примем следующие параметры сбросовой системы (модель источника) и гидрометеорологические характеристики района: средний расход сбросовой системы $Q = 4.6 \text{ м}^3/\text{с}$; глубина сброса $H = 70 \text{ м}$; длина диффузора $L = 90 \text{ м}$; начальная скорость истечения из диффузора $u = 3 \text{ м/с}$; глубина залегания термоклина $h = 35 \text{ м}$; градиент плотности $\partial\rho/\rho_0 = 10^{-3}$; скорость ветра $W_0 = 5 \text{ м/с}$, угол между направлениями распространения поверхностной и внутренней волны $\Theta = 35^\circ$. Ниже приведены некоторые из оценок, полученных с использованием модулей 6–9 комплексной модели (рис. 1).

Искажения поверхностного волнения внутренними волнами

Оценку деформаций поверхностного волнения, вызываемых внутренними волнами, генерируемыми глубинными стоками (модуль 9), проведем тремя методами.

Метод I. Оценка контрастов дисперсий уклонов $\sigma_e^2 = \langle (\partial\xi/\partial x)^2 + (\partial\xi/\partial y)^2 \rangle$ по методу Хьюза и Гранта [40]:

$$(\sigma_\varphi/\sigma_{\varphi_0})^2 = \exp(RU/c), \quad (13)$$

где σ_{e_0} – дисперсия уклонов в невозмущенной области; ξ – возвышение поверхности;

$$R = 5.1 \lg W_B/c + 6.5; \quad (14)$$

U – скорость поверхностного течения, вызванного внутренней волной; c – фазовая скорость внутренней волны.

Метод II. Оценка контрастов амплитуд поверхностных волн в соответствии с теорией Филлипса и Гарджета–Хьюза [29, 32, 42]. При этом горизонтально-неоднородные течения, создаваемые внутренними волнами, генерируемыми при сбросах сточных вод, приводят к гасящему действию на рябь, изменяя амплитуды морских волн:

$$\frac{a}{a_0} = \left[\frac{c_0(c_0 - 2c_i)}{c(c + 2U - 2c_i)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (15)$$

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2(c_0 - c_i)} \times$$

$$\times \left\{ c_0 + (c_0 - 2c_i) \left[1 + \frac{4U/(c_0 - c_i)}{(c_0 - 2c_i)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} = \left(\frac{k_0}{k} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (16)$$

где a/a_0 – изменения амплитуды поверхностной волны (индекс 0 относится к случаю $U = 0$); c/c_0 – изменение фазы поверхностной волны; c_i – фазовая скорость наивысшей моды внутренних волн; k/k_0 – изменение волновых чисел поверхностных волн.

Метод III. Оценка контрастов спектров волнения в области выхода внутренних волн $k = \Psi/\Psi_0$ (Ψ_0 – спектр невозмущенной поверхности). В качестве исходного используется кинетическое уравнение для спектральной плотности волнового действия ветровых волн [17, 29]. При разработке моделей применялись: механизм влияния течений, создаваемых внутренней волной, изменяющих спектр волнения в м- и дм-диапазонах волн (кинетические модели) [29, 31, 32, 42], а также пленочный механизм воздействия внутренних волн на см-рябь (пленочные модели) [29, 30].

Первый механизм наиболее эффективен при выполнении условия группового синхронизма [31, 32]

$$\frac{1}{2} = \sqrt{\frac{g}{k}} \cos \Theta = c_i, \quad (17)$$

когда проекция групповой скорости ветровой волны на направление распространения внутренней волны равна ее фазовой скорости c_i . При этом возникают эффекты захвата и блокировки поверхностных волн полем внутренней волны. На основании решения исходного кинетического уравнения с привлечением уравнения движения волновых пакетов поверхностных волн в поле внутренней волны [31] получены выражения для оценок контрастов спектров ветрового волнения. При этом наибольший контраст наблюдается для поверхностных волн, распространяющихся под углом $\Theta = 35^\circ$ к направлению распространения внутренней волны

$$K = \frac{\Psi}{\Psi_0} =$$

$$= \begin{cases} 1 + \frac{4}{5\sqrt[3]{3}} \frac{\omega_i \beta}{\alpha(k, W_B)} \left(p + \frac{1}{2} \right), & \beta < \beta_0, \quad \beta_0 = \left(\frac{5\alpha}{\omega_i} \right)^{\frac{3}{2}}, \\ 1 + \frac{4}{3} (g\beta)^{\frac{1}{3}} \left(p + \frac{1}{2} \right), & \beta > \beta_0. \end{cases} \quad (18)$$

где $\beta = U_\beta/c_i$; U_β – скорость течения на поверхности; ω_i – частота внутренней волны; $\alpha(k, W_B)$ – инкремент нарастания ветровых волн; p – показатель степени в аппроксимации пространственно-го спектра ($\Psi \sim k^p$).

Для оценки величины инкремента используется аппроксимация Хьюза [31, 32]:

$$\begin{aligned} \alpha(k, W_B) &= 0.05 \times 10^{-2} k W_B \cos(\mathbf{k}, \mathbf{W}_B) \times \\ &\times \left[1 + 1.16 \frac{0.05k}{\omega} W_B \cos(\mathbf{k}, \mathbf{W}_B) \right] \times \\ &\times \left\{ 1 - \exp \left[-8.9 \left(\frac{0.05k W_B}{\omega} - 0.03 \right) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (19)$$

Таблица 1. Результаты расчетов поверхностных контрастов

Скорость поверхностных течений, вызванных внутренними волнами U , м/с	Значения поверхностных контрастов, полученных различными методами		
	Метод I ($K = \sigma_\phi/\sigma_{\phi 0}$)	Метод II ($K = a/a_0$)	Метод III ($K = \psi/\psi_0$)
10^{-3}	1.06	1.01	1.01
2×10^{-3}	1.12	1.02	1.05
5×10^{-3}	1.31	1.10	1.12
10^{-2}	1.70	1.24	1.25

Результаты расчетов поверхностных контрастов, выполненных методами оценки вариаций дисперсии (I), амплитуд (II) и пространственных спектров (III) при различных скоростях поверхностных течений, приведены в табл. 1.

Исходные характеристики внутренних волн оценивались в модуле 5 комплексной модели (рис. 1).

Из приведенных данных следует, что при скоростях поверхностных течений, вызванных внутренней волной $U \geq 10^{-2}$ м/с, величины поверхностных контрастов принимают значения 1.24. Такие возмущения принципиально могут быть зарегистрированы дистанционными средствами.

Следует отметить, что расчеты величин возмущений поверхности внутренними волнами производились без учета механизмов усиления внутренних волн, которые могут существенно повысить эффективность их взаимодействия с поверхностным волнением.

Деформации поверхности всплывающими вихрями (модуль 8)

Вихревые структуры больших масштабов обладают значительной стабильностью и, существуя длительное время, проходят в среде довольно большие расстояния, доходят до поверхности и взаимодействуют с ней. Для оценки возмущений поверхности идеальной несжимаемой жидкости,

вызванных такой вихревой структурой, используются формулы, полученные в [14, 15]

$$U'\xi = \Gamma R_0^2 U_B \exp[-\phi H(\xi)] \frac{\phi H(\xi) + 1}{H^2(\xi)}, \quad (20)$$

где $U'\xi$ – преобразование Ханкеля от скорости течения, вызываемого на поверхности выбранной вихревой структурой; Γ – интенсивность вихря, которая может быть оценена из формулы Кельвина–Лемба [17, 29, 33]; (a – радиус сечения вихря):

$$U_B = \frac{\Gamma}{4\pi R} \left(\ln \frac{8R}{a} - \frac{1}{4} \right), \quad (21)$$

R – радиус вихря; U_B – скорость вихря; H – глубина; ξ , ϕ – параметры интегрирования.

На основе формул (20), (21) проведен расчет профиля свободной поверхности жидкости при взаимодействии с кольцевым вихрем. Расчеты выполнены для тонкого кольцевого вихря радиусом $R = 2.5$ м, который двигался с глубины $H_0 \cong 100$ м со скоростью $U_B = 1$ м/с. Эти характеристики вихря получены на основании оценок, проведенных в соответствии с модулем 4 комплексной модели (рис. 1).

Обобщенные результаты расчетов амплитуды возмущений для широкого диапазона параметров U_B (от 0.3 до 1.5 м/с) и H (от 60 до 20 м) представлены в табл. 2 (начальный диаметр вихря 10 м).

Анализ результатов расчетов показывает, что при начальной скорости движения вихрей U_B , больших 1 м/с, и для глубин 20–30 м вихри диаметром 10 м порождают возмущения поверхности воды до десятков сантиметров, которые легко могут быть обнаружены дистанционными методами. Вихри малого начального диаметра вызывают возмущение свободной поверхности океана на уровне долей миллиметра.

Деформации поверхности при взаимодействии с всплывающей струей (модуль 6)

Оценить отклонения $S(x)$ свободной поверхности жидкости, вызываемые струями сточных

Таблица 2. Обобщенные результаты расчетов амплитуды возмущений

Скорость U_B , м/с	Амплитуды возмущений поверхности, вызываемых вихрями, всплывающими с глубин H , м				
	60	50	40	30	20
0.3	5.3×10^{-4}	8.8×10^{-4}	1.7×10^{-3}	4.0×10^{-3}	1.3×10^{-3}
0.5	1.1×10^{-3}	2.1×10^{-3}	4.5×10^{-3}	1.1×10^{-2}	4.0×10^{-2}
1.0	4.6×10^{-3}	9.8×10^{-3}	1.7×10^{-2}	4.3×10^{-2}	1.4×10^{-1}
1.2	7.9×10^{-3}	1.2×10^{-2}	2.7×10^{-2}	5.9×10^{-2}	2.0×10^{-1}
1.5	1.2×10^{-2}	12.1×10^{-2}	3.8×10^{-2}	9.3×10^{-2}	3.1×10^{-1}

вод, можно с помощью формул, полученных в [11, 14]

$$S(x) = \frac{u^2}{2g} \left(\frac{1}{H} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{\pi x}{2H} \right)^2 \right], \quad x \ll H, \quad (22)$$

$$S(x) = \frac{2u^2}{g} \left(\frac{1}{H} \right)^2 l - \frac{\pi x}{H}, \quad x \gg H, \quad (23)$$

где u – скорость истечения из диффузора; x – ось координат вдоль диффузора; $l = L/2$ – половина длины диффузора.

Свободная поверхность под воздействием восходящей струи приобретает форму параболы непосредственно над диффузором и экспоненциально приближается к положению равновесия по мере удаления от него. Наибольшее отклонение свободной поверхности наблюдается при $x = 0$:

$$S_{\max} = S(0) = \frac{1}{2g} \left(\frac{ul}{H} \right)^2. \quad (24)$$

Поскольку величина ul представляет собой половину потока, приходящегося на единицу длины диффузора, то для величины максимального отклонения свободной поверхности от горизонта ($z = 0$) можно записать

$$S_{\max} = S(0) = \frac{1}{2g} \left(\frac{Q}{2LH} \right)^2. \quad (25)$$

Расчеты с использованием (22)–(25), проведенные для приведенных выше параметров сбросовой системы, показывают, что отклонения свободной поверхности изменяются в пределах $3 \times 10^{-11} < S < 3 \times 10^{-10}$ м. Таким образом, вызываемое струей сточных вод возмущение свободной поверхности чрезвычайно мало и вряд ли может быть зарегистрировано аэрокосмической аппаратурой.

Анализ оценок показывает, что такие механизмы, как воздействие внутренних волн и всплывающих струй, создаваемых при сбросах сточных вод, приводят к деформациям морской поверхности, которые могут быть обнаружены дистанционными методами.

Искажения поверхности пленками ПАВ (модуль 7)

Для оценки таких искажений в работе [43] получена формула для расчета декремента затухания пленки с конечной упругостью

$$\gamma = \gamma_0 \frac{\gamma_0/\sigma - \chi(\gamma_0/\sigma)^{\frac{1}{2}} + 0.5\chi^2(\sigma/\gamma_0)}{\gamma_0/\sigma - 2\chi(\gamma_0/\sigma)^{\frac{1}{2}} + 2\chi}, \quad (26)$$

где γ_0 – декремент затухания при отсутствии пленки; $\chi = (k^3/\sigma)p/\rho$; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; P – упругость пленки; ρ – плотность воды.

Контраст спектров $K = \Psi_{\text{слик}}/\Psi_{\text{фон}}$ может быть оценен по формуле [30]

$$K = \frac{2\gamma(k, P_{\text{фон}}) - \beta(k, W_{\text{в}})}{2\gamma(k, P_{\text{слик}}) - \beta(k, W_{\text{в}})}, \quad (27)$$

где $\beta(k, W)$ – ветровой инкремент; $W_{\text{в}}$ – скорость ветра.

Оценки, выполненные по этим формулам, показали, что при упругости пленки $P = 10$ дин/см величины контрастов спектров составили 1.5–5 дБ при $W_{\text{в}} = 6$ м/с, при $P = 30$ дин/см $W_{\text{в}} = 7.5$ м/с $K = 1.5$ –4.5 дБ, а при $P = 30$ дин/см и $W_{\text{в}} = 1.0$ м/с величины контрастов изменяются в пределах $K = 7.5$ –10 дБ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для обнаружения таких антропогенных воздействий на прибрежные воды, как глубинные стоки, перспективно использование оптических и РЛ-методов ДЗ. Как уже отмечалось, воздействие глубинных стоков приводит к более или менее существенному подавлению высокочастотной части спектра ветрового волнения под действием внутренних волн, всплывающих вихрей и пленок ПАВ, т.е. к образованию сликов, которые могут наблюдаться на оптических и РЛ-изображениях [6, 23–27, 29]. При этом искажаются в основном гравитационно-капиллярные компоненты волнения, хотя именно они в наибольшей степени ответственны за формирование РЛ-сигнала от морской поверхности, в соответствии с условием брэгговского резонанса [44] $\lambda = 2L \sin \theta$, где λ – длина волны электромагнитного излучения; L – длина волны компоненты морского волнения; θ – угол падения. Соответствующая длина волны резонансной компоненты РЛ-сигнала лежит в области 2–8.8 см для $\theta = 45^\circ$. Общий диапазон длин электромагнитных волн, в котором уверенно наблюдаются слики, с помощью радиолокаторов составляет 2–20 см, несколько смещаясь в сторону больших длин волн λ при увеличении угла падения θ [6, 25, 27, 44].

Для демонстрации возможности дистанционного обнаружения сликов, вызванных сбросами сточных вод, РЛ-методами рассмотрим результаты обработки изображений, полученных с помощью РСА космического аппарата “Алмаз” для акватории Черного моря в районе г. Севастополь. На рис. 3а в качестве примера представлен фрагмент РЛ-изображения, на котором наблюдается ряд поверхностных аномалий, в том числе сликовая зона, образованная заглубленным городским стоком. Изображение, приведенное на рис. 3, под-

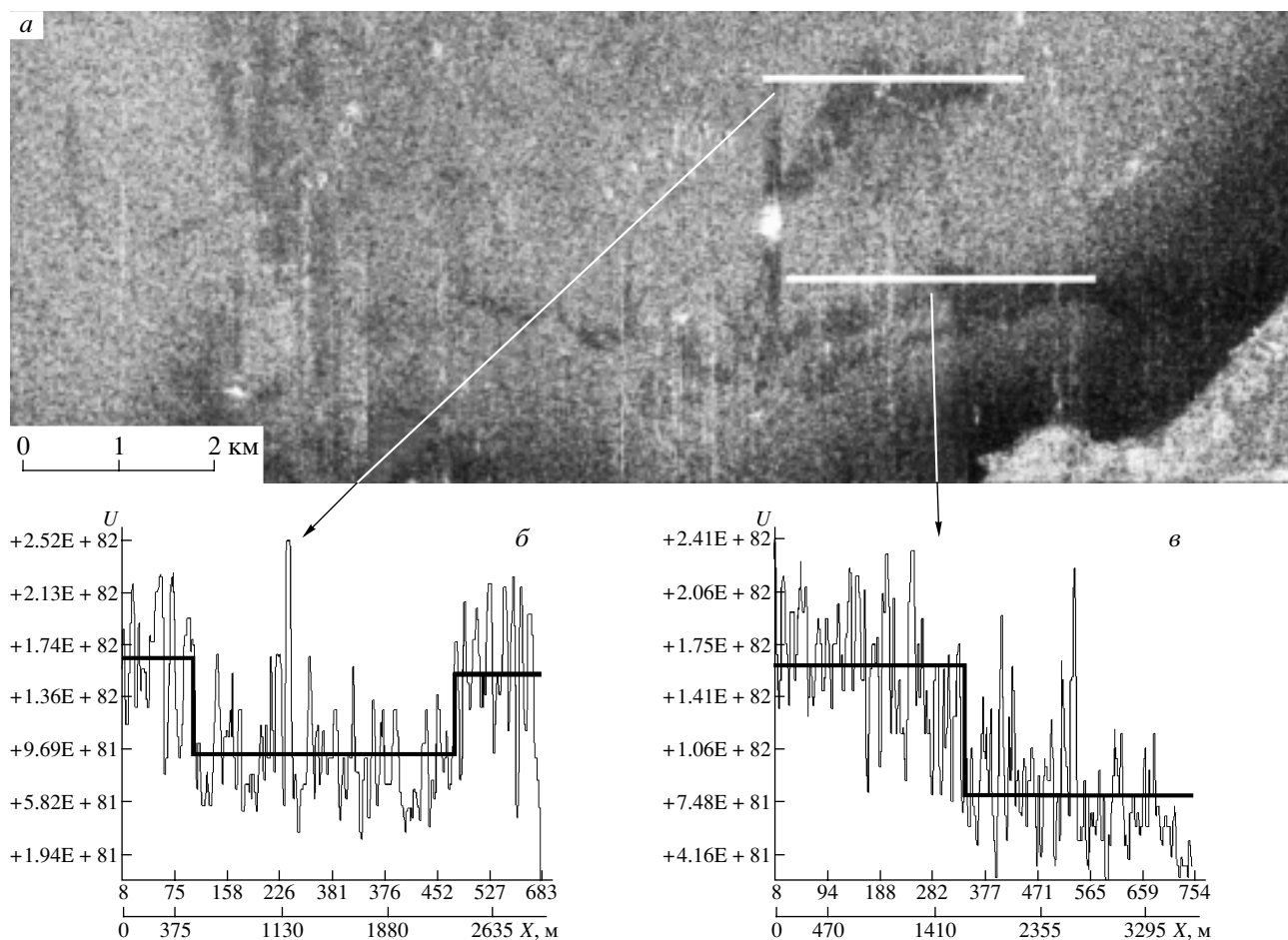


Рис. 3. Фрагмент РЛ-изображения со спутника, вызванный сливом нефтепродуктов с судна и аномалией, образованной заглубленным стоком (а) и одномерные сечения РЛ-сигналов $U(x)$ в выбранных направлениях (б, в).

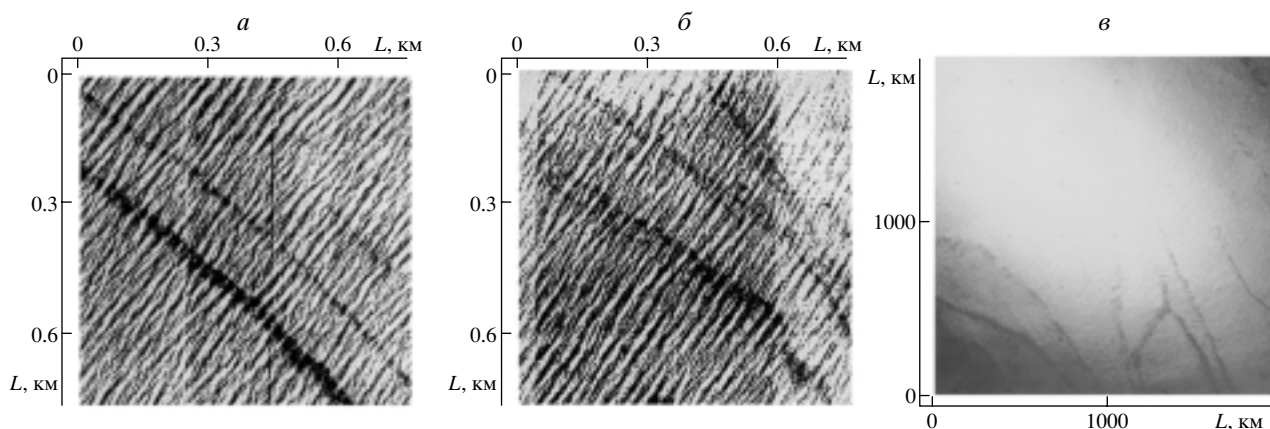


Рис. 4. Изображения спутников в области выходов внутренних волн, полученные с высот 7500 м (а, б) и 2000 м (в).

вергалось специальной обработке – осредняющей фильтрации скользящим окном 5×5 элементов с единичным ядром [45]. Спик, проявляющийся на РЛ-изображении, имеет вид длинной извилистой полосы, берущей начало в месте расположения од-

ного из городских выпусков сточных вод (объемный сток около $0.3 \text{ м}^3/\text{с}$). Направление полосы соответствует направлению прибрежного противотечения, возникающего из-за втягивающей силы струи основного прибрежного течения Юг–Север

в районе мыса Херсонес. Наиболее вероятная причина этого эффекта – заглубленный характер стока и приблизительное совпадение плотностей сточных вод и окружающей морской воды. В результате этого всплытие глубинного стока происходит достаточно медленно, длина слика возрастает, при этом перенос сброшенных вод определяется не поверхностным течением и ветровым сносом, а глубинным течением, имеющим иное направление.

Контраст слика определялся по формуле

$$K_A = 20 \lg(U_S/U_0), \quad (28)$$

где U_S и U_0 – амплитуды РЛ-сигналов в зоне слика и фона соответственно.

Амплитуда U_S определялась как среднее значение сигнала в окне $200 \text{ м} \times 200 \text{ м}$, причем измерения проводились несколько раз в различных участках слика. Значение фоновой амплитуды U_0 было определено как среднее значение сигнала в окне $1000 \times 1000 \text{ м}$ в зоне изображения, свободной от аномалий. Контраст (28) измерялся на всем протяжении слика (рис. 3в), достигая величин: 6–7 дБ вблизи берега; 2.5...–3.5 дБ на расстоянии 2–5 км от истока и 1.5–2 дБ на большем расстоянии. Данный слик, обусловленный заглубленным сбросом, при средней ширине 200–300 м прослеживается на длину порядка 7–8 км. Для сравнения на рис. 3б представлено одномерное сечение РЛ-сигнала $U(x)$ в области слива нефтепродуктов с корабля (светлое пятно на РЛ-изображении).

Сликовые образования, обусловленные выходом на поверхность внутренних волн, отчетливо проявляются также на оптических изображениях. На изображениях, полученных с высот 2000 м и выше, слики видны в виде длинных полос отрицательного (иногда положительного) контраста (см. рис. 4) [6, 22, 24]. Представленные на этом рисунке изображения получены над акваторией Черного моря с борта самолета с высот 7500 м (а, б) и с борта вертолета с высоты 2000 м (в).

При съемке с малых высот (100–300 м) размеры сликов соизмеримы с размерами изображений или больше их. На рис. 5, в качестве примеров, представлены изображения однородной морской поверхности (а, д) и сликов (в, ж), полученные с борта вертолета с высоты 300 м при скорости ветра $W_B \cong 1.5 \text{ м/с}$ (а, в) и с высоты 150 м при $W_B \cong 10.5 \text{ м/с}$ (д, ж), а также двумерные пространственные спектры этих изображений. Из рисунка 5а, г видно, что двумерный спектр в области слика (г) уже, чем спектр вне его (б), что вызвано “выглаживанием” мелких волн в областях взаимодействия с внутренними волнами, обусловленными заглубленными стоками. Это проявляется и на исходном оптическом изображении рис. 5а, в. Вид и контраст сликов зависит от скорости ветра, с увели-

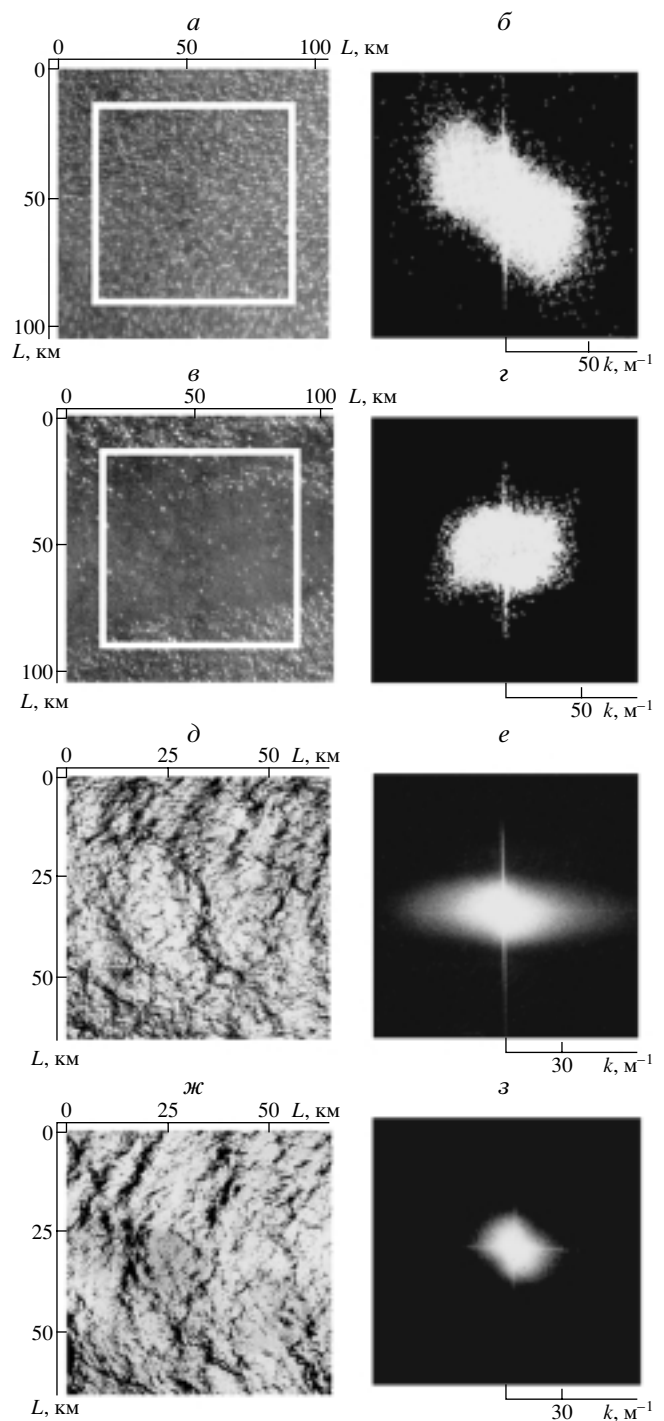


Рис. 5. Изображения в области однородного фона (а, д) и сликов (в, ж), снятые с высот 300 м (а, в) и 150 м (д, ж) при скоростях ветра $W_B \cong 1.5 \text{ м/с}$ (а, в) и $W_B \cong 10.5 \text{ м/с}$ (д, ж) и соответствующие им двумерные пространственные спектры.

чением которой слики становятся менее заметными, а иногда и неразличимыми визуально вообще [6, 22–25]. Несмотря на то, что при визуальном анализе изображения, приведенные на рис. 5д, ж, неразличимы, сравнение их пространственных

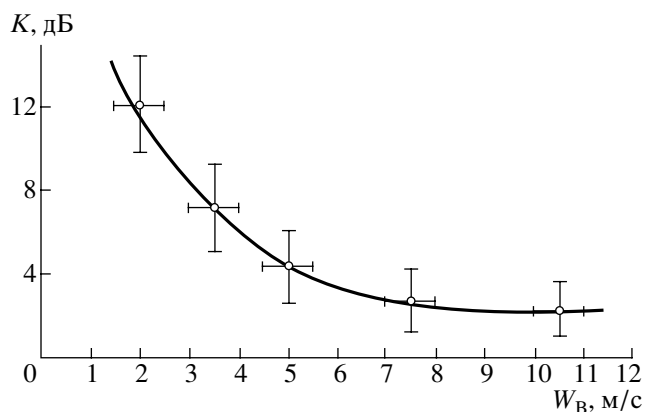


Рис. 6. Зависимость контрастов спектров в области взаимодействия внутренних волн с поверхностным волнением от скорости ветра.

спектров позволяет сделать вывод о том, что спектр в области слайка (δ) более узкий по сравнению с фоном (e). Это свидетельствует, как и в случае, рассмотренном на рисунке 5а–г, о выглаживании высокочастотных спектральных компонент в области выхода внутренних волн.

В результате статистической обработки пространственных спектров оптических изображений, полученных с борта вертолетов (высоты полетов 100–300 м), для “чистой” морской поверхности и морской поверхности со слайками, вызванными внутренними волнами, имеющими параметры, подобные тем, которые могут наблюдаться при заглубленных стоках, получены значения математических ожиданий M и дисперсий D контрастов спектров для пространственной частоты $\nu_0 = 0.25 \text{ см}^{-1}$ (длина волны 4 см)

$$K = -10 \lg [S(\nu_0) / \bar{S}_\phi(\nu_0)], \quad (29)$$

где $S(\nu_0)$ – текущее значение спектра; $\bar{S}_\phi(\nu_0)$ – среднее значение спектра для фона.

Эксперименты проводились при скоростях ветра 1–12 м/с в одном и том же районе Черного моря [6, 24, 25, 27] и показали, что при этих условиях выглаживание пространственных спектров в зоне слайков происходит для пространственных частот $0.8 \times 10^{-2} - 1 \text{ см}^{-1}$, что соответствует пространственным масштабам (длинам волн) 1–120 см.

На рис. 6 рассмотрена зависимость математических ожиданий и контрастов спектров (29) от скоростей ветра $K = f(W_B)$. Анализ данных, приведенных на рис. 6, показывает, что при возрастании скорости ветра контрасты спектров слайков уменьшаются, что соответствует существующим физическим представлениям.

Кроме этого анализировались параметры степенных аппроксимаций одномерных сечений двумерных пространственных спектров изображений $S(\nu) \sim \nu^{-p}$, отображающих спектры уклонов поверхностных волн [23, 24]. Значение параметров наклона для спектров изображений фона составили величину $p_\phi = 2.1 \pm 0.16$ при скоростях ветра $W_B = 1 \dots 10 \text{ м/с}$, а для спектров слайков, вызванных внутренними волнами, параметры наклона составили величины $p_{\text{сл}} = 3.6 \pm 0.12$ при $W_B = 1 - 1.5 \text{ м/с}$; $p_{\text{сл}} = 3.2 \pm 0.14$ при $W_B = 2.5 \text{ м/с}$; $p_{\text{сл}} = 3.0 \pm 0.09$ при $W_B = 4 \text{ м/с}$; $p_{\text{сл}} = 2.85 \pm 0.08$ при $W_B = 5 \text{ м/с}$; $p_{\text{сл}} = 2.4 \pm 0.1$ при $W_B = 7 \text{ м/с}$; $p_{\text{сл}} = 2.28 \pm 0.06$ при $W_B = 10.5 \text{ м/с}$.

Как уже отмечалось выше, в области заглубленных стоков на морской поверхности под действием различных возмущений, связанных с этими явлениями, могут возникать пленки ПАВ или происходить перераспределения полей естественных ПАВ. Это может быть обнаружено на оптических изображениях.

На рис. 7, 8 приведены результаты цифровой обработки оптических изображений чистой морской поверхности и поверхности с пленками ПАВ, полученных с борта вертолетных лабораторий МИ-8 в акватории Черного моря с высоты $H = 150 \text{ м}$, при скорости приповерхностного ветра $W_B \cong 2 \text{ м/с}$ [6, 24]. На рис. 7б представлен спектр

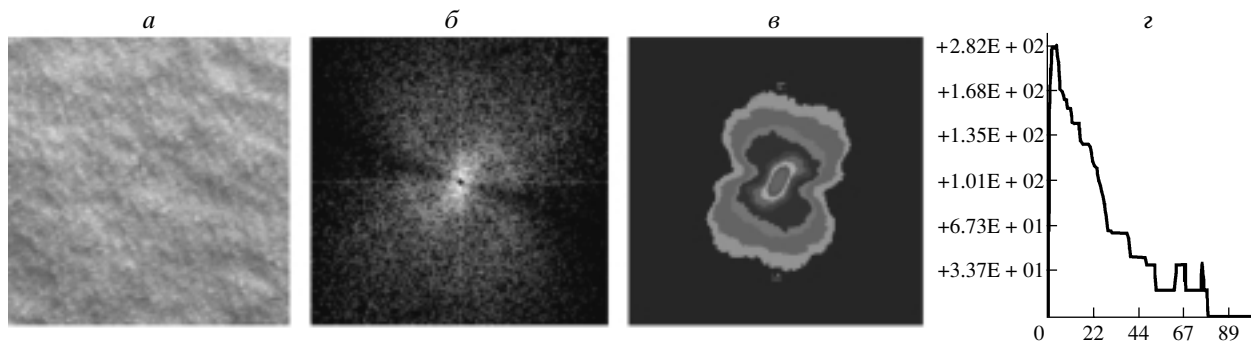


Рис. 7. Изображение чистой морской поверхности (а); двумерный пространственный спектр (б); медианная фильтрация двумерного спектра (в); одномерное сечение спектра (г).

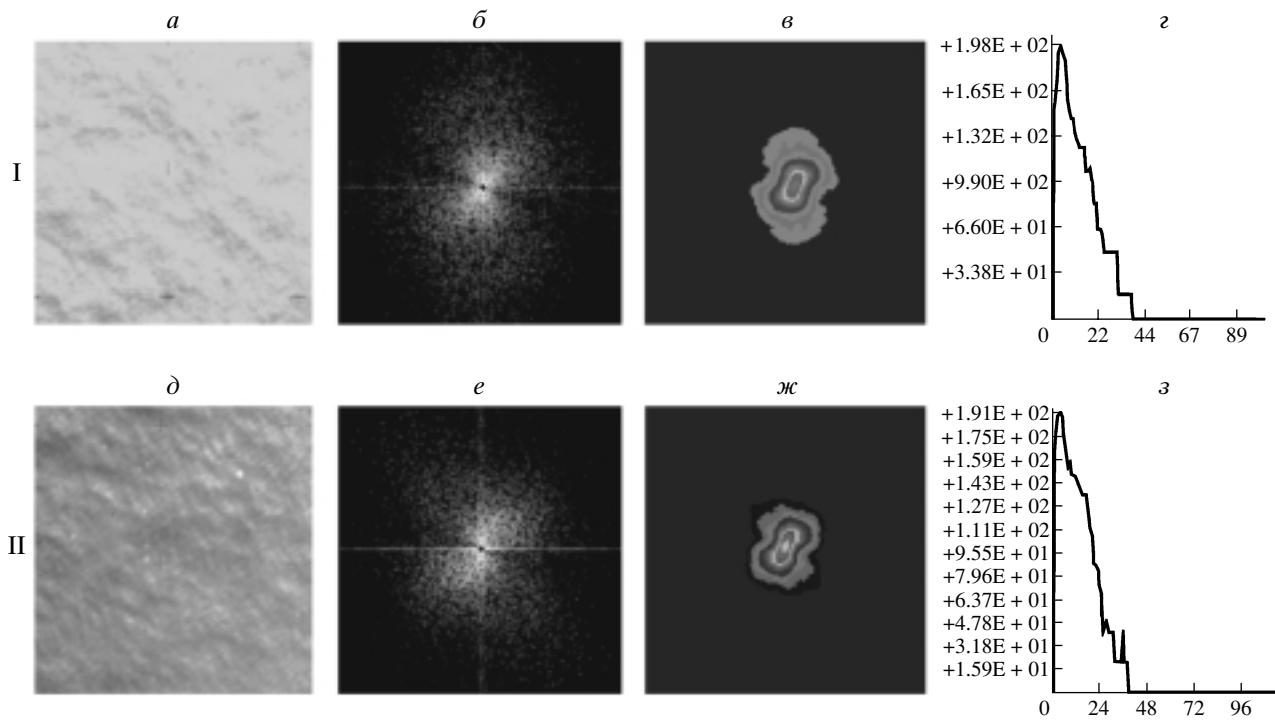


Рис. 8. Фрагменты изображений с пленками ПАВ; двумерные пространственные спектры (б, е); медианная фильтрация двумерных спектров (в, ж); одномерные сечения спектров (з, з).

фрагмента изображения чистой морской поверхности, а на рис. 8(б, е) спектры фрагментов изображений с пленками ПАВ большей (е) и меньшей (б) толщины. Как видно из рисунков 7(б) и 8(б, е), спектры изображений с пленками ПАВ отличаются от спектра изображения чистой морской поверхности выглаживанием высокочастотных составляющих волнения. Медианная фильтрация и пороговая обработка двумерных спектров (рис. 7в, 8(в, ж)) позволяет более наглядно выявить их различие.

На рис. 7 (чистая поверхность), и 8(з, з) (пленка ПАВ) представлены одномерные сечения этих спектров. При сравнении рисунков видно, что показатель наклона спектров, соответствующих изображениям с пленками ПАВ, более крутой, чем показатель наклона спектра изображения чистой морской поверхности.

Для исследования влияния пленок ПАВ на поверхностное волнение проводились также комплексные эксперименты с гидрофизической платформы в акватории Черного моря при скорости ветра $W_{в} = 5$ м/с [6, 24, 46], включавшие фотосъемку с последующим восстановлением спектров возвышений нелинейным многопозиционным методом [6, 24, 47], стереофотосъемку с последующим восстановлением рельефа поверхности стереофотограмметрическим методом и определением спектров возвышений, а также контактные измерения спектров струнными волнографами.

В результате обработки экспериментальных данных различными методами получались оценки одномерных спектров возвышений

$$\chi(k) = \int \Psi(\bar{\mathbf{k}}) |\bar{\mathbf{k}}| d\varphi, \quad (30)$$

где $\varphi = \arctg(k_x/k_y)$, $\Psi(\bar{\mathbf{k}})$ – двумерный спектр возвышений, $k = |\bar{\mathbf{k}}| = 2\pi/\Lambda$ – волновое число.

На рис. 9а показаны оценки одномерных спектров $\chi(k)$ для чистой поверхности и пленки ПАВ, полученные нелинейным многопозиционным методом по оптическим изображениям (кривые 1), стереофотограмметрическим методом (кривые 2) и контактным методом (кривые 3). Как видно из этого рисунка, пленка ПАВ на воде вызвала общее уменьшение спектральной плотности волнения во всем диапазоне анализируемых длин волн $\Lambda = 0.1 \dots 1$ м, что проявляется по данным всех методов измерений. Контраст аномалии морской поверхности $K(k) = 10 \lg[\chi_a(k)/\chi_{\phi}(k)]$ составляет в среднем величину около 3 дБ. Вместе с тем в аномальном спектре возвышений хорошо заметно усиленное гашение волн с длинами 0.3–0.6 м (“провал” в спектре $\chi(k)$), где контраст достигает величины 10 дБ.

Коэффициенты корреляции дисперсий и параметров наклонов спектров $\chi(k) \sim k^{-p}$ для чистой морской поверхности и пленки ПАВ составляют величины от 0.7 до 0.95 [6, 24, 46].

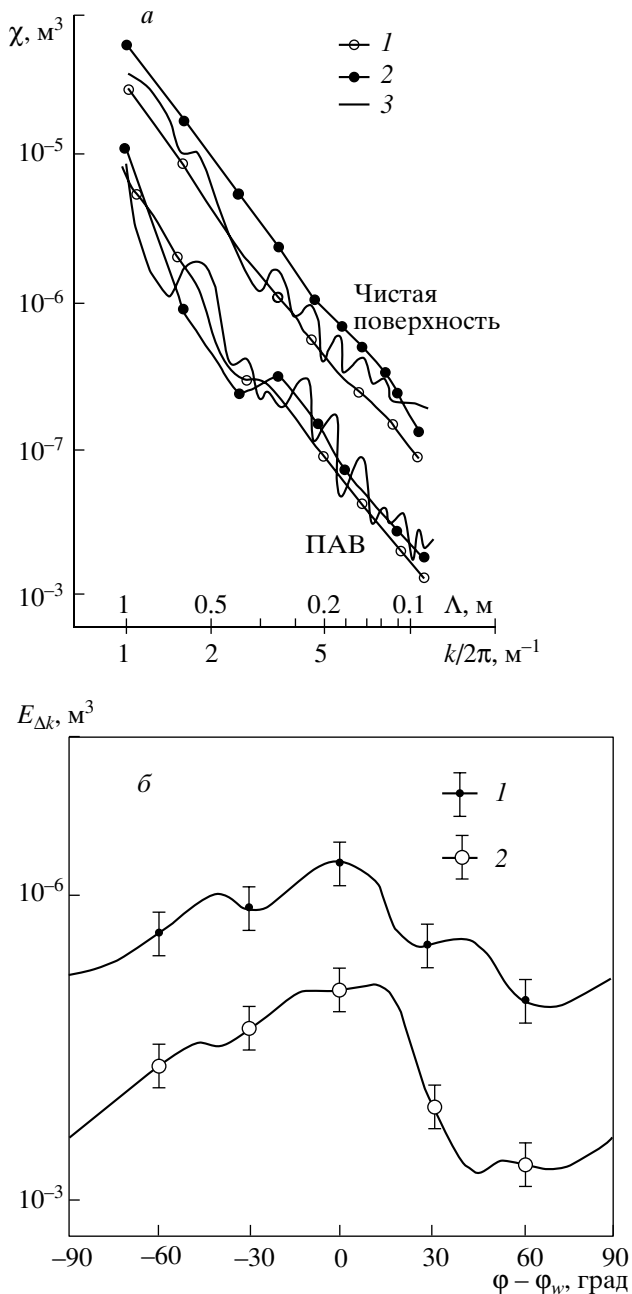


Рис. 9. Спектры волновых чисел $\chi(k)$, измеренные нелинейным многопозиционным (1), стереофотограмметрическим (2) и контактным (3) методами для чистой морской поверхности и аномалии, вызванной пленкой ПАВ (а). Функция углового распределения спектральной энергии $E_{\Delta k}(\phi)$ в диапазоне длин волн 0.1...1.0 м для чистой морской поверхности (1) и аномалии, вызванной пленкой ПАВ (2, б).

Значения параметров наклона спектров для чистой поверхности в анализируемом диапазоне длин волн составляют 2.63 ± 0.09 [6, 31], что близко к имеющимся данным ($p = 3$ – Филипс [42], Пирсон–Московитц [48], $p = 2.6$ – Лейкин [49], $p = 2.5$ – Тоба [50]).

Для исследования двумерных спектров возвышений в области фона и аномалии морской поверхности, вызванной пленкой ПАВ, была рассчитана функция углового распределения энергии $E_{(\Delta k)}(\phi)$

$$E_{(\Delta k)}(\phi) = \int_{k_1}^{k_2} \chi(k, \phi) dk, \quad (31)$$

в диапазоне волновых чисел (k_1, k_2) , соответствующем длинам волн от 0.1 до 1.0 м.

Вид функции $E_{(\Delta k)}(\phi)$ для спектров возвышений, восстановленных нелинейным многопозиционным методом [24, 47] для чистой морской поверхности и пленки ПАВ показан на рис. 9б. Функция $E_{(\Delta k)}(\phi)$ для фона имеет максимум в направлении действия ветра ($\phi = \phi_w$) и два менее интенсивных локальных максимума, связанных, вероятно, с неравномерностью ветрового поля над морской поверхностью.

Приведенные результаты наглядно демонстрируют эффективность дистанционных методов анализа выходов внутренних волн и пленок ПАВ, подобных тем, которые могут наблюдаться при выбросах сточных вод.

Для сопоставления полученных экспериментальных данных с результатами моделирования использовались размеры и контрасты поверхностных неоднородностей в зоне глубинных стоков.

Размеры поверхностных неоднородностей, полученные на основании модельных данных (блоки А и В), составляют величины 0.1–6.0 км. Оценки размеров поверхностных аномалий получены по формулам (9), (10) для следующих значений параметров: скорость течения $U = 20$ см/с; уровень предельно допустимой концентрации примеси $C_0 = 10^{-6}$ г/см³; коэффициенты диффузии $D_L = 10^4$ см²/с, $D_z = 10$ см²/с. Результаты экспериментальных исследований поверхностных проявлений глубинных стоков, выполненных с помощью космической РЛ-аппаратуры в районе г. Севастополь, показывают, что размеры этих явлений на поверхности составляют 0.2–8.0 км (см. рис. 3). Контрасты спектров в области внутренних волн по сравнению с фоном, оцененные на основании моделей, составляют величины 1.1–2.5 дБ (см. табл. 1) при $U = 5 \times 10^{-3} \dots 10^{-2}$ м/с, а измеренные в натуральных экспериментах с помощью аэрокосмической оптической и РЛ-аппаратуры при схожих условиях составляют величины 2–7 дБ (рис. 3, 6). Контрасты спектров, обусловленные пленками ПАВ, оцененные с использованием моделей (формулы 26, 27), составляли величины от 1.5 до 10 дБ, а полученные в экспериментах – от 3 до 10 дБ (см. рис. 9).

Анализ модельных и экспериментальных данных показывает, что по порядку величины модельные оценки согласуются с эксперименталь-

ными данными. Однако следует отметить, что теоретические оценки величин контрастов и размеров поверхностных возмущений, вызываемых сбросами сточных вод, иногда несколько занижены по сравнению с экспериментальными данными. Это может быть связано с тем, что условия проведения экспериментов и условия, используемые при моделировании (расход, глубина сбросов, стратификация, скорости течений и др.), не всегда совпадали, а также с тем, что в используемых математических моделях не учтены все эффекты и механизмы взаимодействия струй с окружающей морской средой. Так, например модельные оценки производились без учета механизмов усиления внутренних волн, которые могут повысить реальные контрасты их поверхностных проявлений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированы основные физические механизмы, характеризующие воздействие глубинных стоков на водную среду и поверхность, свидетельствующие о принципиальной возможности индикации таких антропогенных воздействий на прибрежные акватории аэрокосмическими методами.

Предложена комплексная математическая модель, описывающая взаимодействия струй сточных вод с морской средой, позволяющая получить количественные оценки возмущений среды и деформаций поверхности, вызываемых различными механизмами, характеризующими это явление (переносом примесей, внутренними волнами, турбулентностью и вихревыми структурами, конвективными движениями, всплывающими струями). Приведены примеры оценок возмущений водной среды и поверхности, а также расчетов переносов загрязнений, получаемые с помощью различных блоков и модулей комплексной модели.

Проанализированы результаты обработки РЛ- и оптических аэрокосмических изображений с поверхностными проявлениями аномалий, связанных с глубинными стоками, или подобными тем, которые могут наблюдаться в области их взаимодействия с поверхностным волнением.

Результаты модельных расчетов соответствуют результатам натуральных экспериментов по дистанционному исследованию отдельных процессов таких антропогенных воздействий. Однако для достижения более полных совпадений результатов моделирования и экспериментальных данных необходимо проведение дальнейших исследований рассматриваемых явлений, в том числе в натуральных условиях.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности дистанционной индикации заглуб-

ленных стоков по эффектам на морской поверхности, что важно для создания эффективных аэрокосмических средств и систем мониторинга таких антропогенных воздействий на прибрежные акватории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Марчук Г.И., Кондратьев К.Я.* Приоритеты глобальной экологии. М.: Наука, 1992. 264 с.
2. *Кондратьев К.Я., Донченко В.К.* Экодинамика и геополитика. Т. 1. Глобальные проблемы (Кондратьев К.Я.) С.-Пб: Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, 1999. 1040 с.
3. *Израэль Ю.А., Цыбань А.В.* Антропогенная экология океана. М.: Гидрометеиздат, 1989. 528 с.
4. *Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С.* Экологический вызов и устойчивое развитие. М.: Прогресс-Традиция, 2000. 416 с.
5. *Савин А.И., Бондур В.Г.* Научные основы создания и диверсификации глобальных аэрокосмических систем // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т.13. № 1. С. 46–62.
6. *Бондур В.Г.* Мониторинг поверхности морей и океанов. Мониторинг загрязнений прибрежных акваторий // Мат. докл. на заседании подгруппы по стихийным бедствиям Рабочей группы по окружающей среде Российско-американской комиссии по экономическому и технологическому сотрудничеству М.: Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ, 1996. 26 с.
7. *Долотов Ю.С.* Проблемы рационального использования и охраны прибрежных областей Мирового океана. М.: Научный мир, 1996. 304 с.
8. *Владимиров А.М., Ляхин Ю.И., Матвеев Л.Т., Орлов В.Г.* Охрана окружающей среды. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 424 с.
9. *Марчук Г.И.* Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М., 1982. 310 с.
10. *Озмидов Р.В.* Диффузия примесей в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 280 с.
11. *Журбас В.М.* Траектории турбулентных струй примеси в устойчиво стратифицированной среде // Вод. ресурсы. 1977. № 4. С. 165–172.
12. *Schrocter H., Hausen J.S.* Mathematical modeling of dilution, advection and spreading, of waste water discharged from ocean outfalls. Comput. Modell. // Eng. Proc. Int. Conf. Venice. 19–23 Sept., 1987. Rotterdam, Brookfield, 1988. P. 347–384.
13. *Верболов В.И., Журбис В.М., Мамедов Р.М., Озмидов Р.В.* Распространение затопленной струи примесей в прибрежной зоне. Течения на Байкале. Новосибирск: Наука, 1977. С. 143–149.
14. *Амбарцумян Е.Н., Аставин В.С., Бояринцев В.И. и др.* Оценка возможности выхода гидродинамических возмущений на поверхность океана при истечении сточных вод из погруженного коллектора. М.: ИПМ РАН "Гидрофизика", 1995. 33 с.
15. *Бояринцев В.И., Кортаев Д.Г., Леднев А.К., Савин А.С.* Движение кольцевого вихря к свободной

- поверхности жидкости: Препринт № 540. М.: ИПМ РАН, 1995. 36 с.
16. Амбарцумян Е.Н., Бояринцев В.И. Взаимодействие осесимметричной затопленной струи со спутным стратифицированным потоком: Препринт № 376. М.: ИПМ АН СССР, 1989. 36 с.
 17. *Океанология*. Физика океана. Т.1. Гидрофизика океана. Т.2. Гидрофизика океана / Под ред. В.М. Каменковича, А.С. Монины. М.: Наука, 1978. Т. 1. – 371 с., Т. 2. – 452 с.
 18. Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкостях. М.: Мир, 1977. 431 с.
 19. Baines P.G., Gill A.E. On thermohaline convection with linear gradients // *J. Fluid Mech.* 1969. V. 37. P. 289–306.
 20. Stern M.E. The “salt-fountain” and thermohaline convection // *Tellus*. 1960. № 12. P. 172–175.
 21. Walin G. Note on the stability of water stratified by both salt and heat // *Tellus*. 1964. № 16. P. 389–393.
 22. Бондур В.Г. Принципы построения космической системы мониторинга Земли в экологических природно-ресурсных целях // *Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка*. 1995. № 1–2. С. 14–27.
 23. Бондур В.Г. Оперативная дистанционная оценка состояния границы раздела атмосфера–океан по пространственным спектрам изображений // *Оптико-метеорологические исследования земной атмосферы*. Новосибирск: Наука, 1987.
 24. Бондур В.Г. Проблемы аэрокосмического мониторинга гидрофизических полей океана. Мат. докл. на сессии Отделения океанологии, физики атмосферы и географии РАН 2000. М.: ГЕОС, 2001. 6 с.
 25. Бондур В.Г., Воляк К.И. Оптический пространственный спектральный анализ изображений морской поверхности // *Исследования по гидрофизике*. Тр. ФИАН. Т. 156. М.: Наука, 1984. С. 63–78.
 26. Арумов Г.П., Бондур В.Г. и др. Пространственный спектральный анализ радиолокационных и фотографических изображений морской поверхности при наличии нефтяных загрязнений: Препринт ИКИ АН СССР. Пр-616, 1981. 19 с.
 27. Бондур В.Г., Литовченко Д.Ц., Старченков С.А. Результаты исследований антропогенных загрязнений прибрежных акваторий по радиолокационным космическим изображениям. *Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка*. 1999. № 3. С. 84–96.
 28. Бондур В.Г., Зубков Е.В. Лидарные методы дистанционного зондирования загрязнений верхнего слоя океана // *Оптика атмосферы и океана*. 2001. Т. 14. № 2. С. 14 с.
 29. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 375 с.
 30. Ермаков С.А., Пелиновский Е.Н., Талипова Т.Г. О влиянии пленок поверхностно-активных веществ на изменение спектров ветрового волнения под действием внутренних волн // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1980. Т. 16. № 11.
 31. Басович А.Я., Баханов В.В., Таланов В.И. Трансформация спектров ветрового волнения короткими цугами внутренних волн // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1987. Т. 23. № 7. С. 694–706.
 32. Динамика волн на поверхности жидкости / Под ред. К.И. Воляка Тр. ИОФАН. Т. 56. М.: Наука–Физматлит, 1999. 176 с.
 33. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. М.: Наука, 1965. 696 с.
 34. Беляев В.И., Кондуфорова Н.В. Математическое моделирование экологических систем шельфа. Киев: Наукова думка, 1990. 242 с.
 35. Марчук Г.И., Кочергин В.П., Саркисян А.С. Математические модели циркуляции в океане. Новосибирск: Наука, 1980. 394 с.
 36. Саркисян А.С. Численный анализ и прогноз морских течений. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 286 с.
 37. Овсиенко С.Н., Зацепя С.Н. В ст. Экологические аспекты охраны морей и океанов от химических загрязнений. М.: Гидрометеоиздат, 1989. 286 с.
 38. Heaps N.S. Development of a three dimensional numerical model for the Irish Sea. *Rapp. P-V. Reun. Cons. Int. Ex. Mar.* 1974. № 167.
 39. Vested H.J., Jensen H.R., Petersen H.M. An Operational Hydrodynamic Warning System for the North Sea and the Danish Beltes // *Continental Shelf Res.* 1992. V. 12. № 1.
 40. Hughes B.A., Grant H.L. The effect of internal waves on surface wind waves. *Theoretical Analysis // J. Geophys. Res.* 1978. V. 83. № C1. P. 455–465.
 41. Филлиус О.М. Динамика верхнего слоя океана: пер с англ. М.: Мир, 1980. 319 с.
 42. Басс Ф.Т., Фукс М.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 436 с.
 43. Бондур В.Г., Старченков С.А. Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // *Изв. ВУЗов. Сер. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2001. № 3. С. 16 с.
 44. Барановский В.Д., Бондур В.Г., Кулаков В.В. и др. Калибровка дистанционных измерений двумерных пространственных спектров волнения по оптическим изображениям // *Исслед. Земли из космоса*. 1992. № 2. С. 59–66.
 45. Бондур В.Г., Мурынин А.Б. Восстановление спектров поверхностного волнения по спектрам изображений с учетом нелинейной модуляции поля яркости // *Оптика атмосферы*. 1991. Т. 4. С. 387–393.
 46. Pirson W.J., Moskowitz L. F propoet spectral form for fullydeveloped Wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodsky // *J. Geophys. Res.* 1964. V. 69. № 23. P. 5181–5190.
 47. Лейкин И.А., Розенберг А.Д. Измерение высокочастотного спектра океанских волн с дрейфующего судна // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1987. Т. 23. № 11. С. 1188–1192.
 48. Toba J. Local balance in the air-sea boundary process // *Oceanogr. Soc. Japan*. 1973. V. 29. P. 209–225.
 49. Галкин Г.И. Моделирование методом Монте-Карло. М.: Наука, 1975. 465 с.
 50. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959. 699 с.

REMOTE INDICATION OF ANTHROPOGENIC INFLUENCE ON MARINE ENVIRONMENT CAUSED BY DEPTH WASTEWATER PLUM: MODELLING, EXPERIMENTS

V. G. Bondur, Y. V. Grebenuk

Central Research Institute "Kometa", Moscow

The analysis of physical processes, that occur when depth wastewater plum influence to marine environment and surface is conducted. This analysis is required to design complex mathematical model of this process. The generalized abstract scheme of complex model is discussed. This model gives satisfy and completely quantitative description event, allowed to obtain quantitative characteristic variation of different parameters of water environment and evaluate impact of depth wastewater plum on littoral ecosystems. Perturbations of marine environment and surface under depth sewage impact are estimated. This estimation show possibility of indication of this perturbation by remote sensing facilities. Comparison of surface perturbation model estimation with experimental data by remote sensing on board equipment from spacecraft, airplane, helicopter, or marina hydrophysics platform is implemented.