

В.Е. ПУТЫРСКИЙ

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОТОКОВ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ВНУТРЕННЕГО МОРЯ

Рассматриваются процессы турбулентного водообмена при смешении речных вод с морскими. Обсуждаются результаты экспериментальных работ по исследованию турбулентности в юго-восточной части Балтийского моря. Используются флюоресцирующие трассеры для проведения натурного моделирования циркуляции. Рассчитываются значения коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии, которые составляют 10^4 – 10^6 $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ в зависимости от масштаба явления. Изучаются причины усиления горизонтального турбулентного обмена вод в районах приустьевого взморья. Анализируются условия образования тонкой гидротермодинамической вертикальной структуры течений.

Смешение речных и морских вод, прибрежный пограничный слой моря, турбулентный водообмен, циркуляция, диффузия примеси.

Введение. Для решения многих задач гидрологии суши исследуется гидродинамическое взаимодействие потоков в прибрежных акваториях внутренних морей, озёр и водохранилищ. При этом большое значение имеет изучение процессов турбулентного перемешивания вод с различными гидрофизическими свойствами в приустьевой области открытых водотоков.

О влиянии морских вод на развитие стока с суши говорится в многочисленных работах, посвящённых интрузии солёных вод моря в прибрежные водоносные горизонты и речные устья, а также – в теории штормовых нагонов. Другое направление исследований связано с оценкой параметров турбулентного водообмена и диффузии примеси при взаимодействии речных и морских вод в прибрежной области. Такая оценка может проводиться на основе методов натурного моделирования гидрофизических процессов.

Ряд свойств взаимодействия речных и морских вод проявляется при их непосредственном контакте в регионах прибрежного пограничного слоя внутреннего моря. В условиях практического отсутствия приливных колебаний, вклад воздействия речного стока на процессы турбулентного перемешивания здесь увеличивается. Прибрежные акватории моря за счёт стока рек подвергаются также наиболее сильному техногенному влиянию, включая загрязнение нефтепродуктами, пестицидами, хлорорганическими соединениями и т.д. Всё это объясняет актуальность изучения проблем распределения вещества и энергии в прибрежных водах.

Проблема исследования. Изучение разномасштабной природы турбулентности – одно из генеральных направлений современной гидрологии [1, 2, 3, 4, 5]. Наиболее полно диффузионные процессы в море описываются с помощью аппарата статистической теории турбулентности. Основными вводимыми в рамках данной теории понятиями являются автокорреляционная функция и энергетический спектр, построенные для пульсационных составляющих (u) и (v') скорости течения. В рамках гипотезы о «замороженной» турбулентности определение коэффициентов горизонтальной турбулентной диффузии может быть получено с помощью сведений о величине скорости диссипации турбулентной энергии или, как её ещё называют, скорости вырождения крупных вихрей.

Автокорреляционная функция имеет вид:

$$R(K) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-K} u'_i u'_{i+K},$$

где $K = 0, 1, \dots, m$, а m – общее число значений корреляционной функции.

В свою очередь спектральная плотность, характеризующая распределение энергии по частотам, выражается так:

$$S(w) = \frac{\Delta t}{\pi} \left[R(0) - 2 \sum_{p=1}^{m-1} R(K)_p \cos Kp\Delta t\Delta w + R(K)_m \cos Km\Delta w \right],$$

где $p = 1, 2, \dots, m-1$; Δt – временной интервал регистрации значений скорости течения, а $\Delta w = \pi/m\Delta t$ – частота.

Оценка скорости диссипации турбулентной энергии выполняется с помощью пространственного спектра скорости течения по формуле:

$$\varepsilon = \left[\frac{S(\gamma)_K}{\eta_0} \right]^{3/2} \gamma^{5/3},$$

в которой $S(\gamma)$ – спектр скорости течения; γ – волновое число; η_0 – универсальный коэффициент, в среднем равный 0,56.

Тогда горизонтальный коэффициент турбулентной диффузии определяется следующей зависимостью:

$$K_t = n_0 \varepsilon^{1/3} l^{4/3},$$

где n_0 – некоторая безразмерная постоянная порядка 0,1.

Если параметры турбулентности получены для спектра, изменяющегося пропорционально закону $(-5/3)$, то тогда наиболее полно отображаются условия турбулентного перемешивания в масштабах от сотен метров до нескольких километров. Именно в этих масштабах наблюдается взаимодействие речных и морских вод в прибрежном пограничном слое.

Однако для получения устойчивой оценки энергетического спектра необходимо большое число измерений скорости течения. Повышение надёжности результатов эксперимента обычно достигается проведением нескольких серий измерений, для которых подбираются соответствующие специфике опыта гидрометеорологические условия. Причём продолжительность наблюдений должна быть порядка месяца.

Методы и постановка задачи. Совместно с методикой статистического анализа эйлеровых характеристик течений используется натурное моделирование диффузионных процессов. В частности натурное моделирование применяется для изучения свойств турбулентного перемешивания при взаимодействии речных и морских вод, позволяя исследовать многие важные закономерности турбулентности и водообменных процессов прямыми способами. В большинстве своём эти способы базируются на наблюдениях за трассерами, состоящими из искусственных пассивных в гидродинамическом отношении примесей, а также на слежении за свободно плавающими объектами – дискретными индикаторами. Следует, однако, заметить, что несмотря на активное использование различными авторами натурного моделирования

процессов турбулентного водообмена, методика проведения подобных опытов нестандартна и в каждом конкретном случае по-прежнему требует отдельного рассмотрения.

Привлечение естественных трассеров в виде различного рода физических параметров и химических компонентов морской воды способствовало лучшему пониманию особенностей крупномасштабной циркуляции, природы слагающей её водных масс, внутренних волн и многих других явлений, с трудом поддающихся непосредственному изучению.

Наряду с естественными трассерами для изучения водообменных процессов находят применение вещества, состоящие из искусственных пассивных в гидродинамическом отношении примесей. Так, при исследованиях турбулентности и структуры течений нередко используются флюоресцирующие трассеры. Опыты с флюоресцирующими трассерами позволяют получать такие важные характеристики турбулентности, как коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии, его зависимость от масштаба явления, скорость изменения концентрации вносимой в море пассивной примеси, а также сведения о распространении красителя с поверхности моря в глубинные горизонты.

Исследования и результаты. Натурные эксперименты проводились в юго-восточной части Балтийского моря в районе впадения рек Вислы, Преголи и Немана (рис. 1).

Как правило, в экспериментах участвовало два судна – основное и вспомогательное небольшого водоизмещения, что обеспечивало отбор проб на предельных глубинах вблизи берега. Нами фиксировалось изменение во времени горизонтальных размеров пятна красителя на поверхности моря, определялась концентрация красителя в облаке примеси. Одновременно выполнялся комплекс гидрометеорологических наблюдений и работало несколько автоматических буйковых станций (АБС). Причём АБС выставлялись в районе эксперимента с заблаговременностью в несколько суток, что позволяло располагать информацией об истории развития процесса.

По истечении одного часа после выпуска на поверхность моря красителя начинался отбор проб воды с помощью батометров со вспомогательного судна. При этом во избежание деформации облака примеси вспомогательное судно входило в облако с наветренной стороны в дрейфе. Отбор проб производился в центре пятна и на его границах с горизонтов 0, 2, 5 и 10 метров.

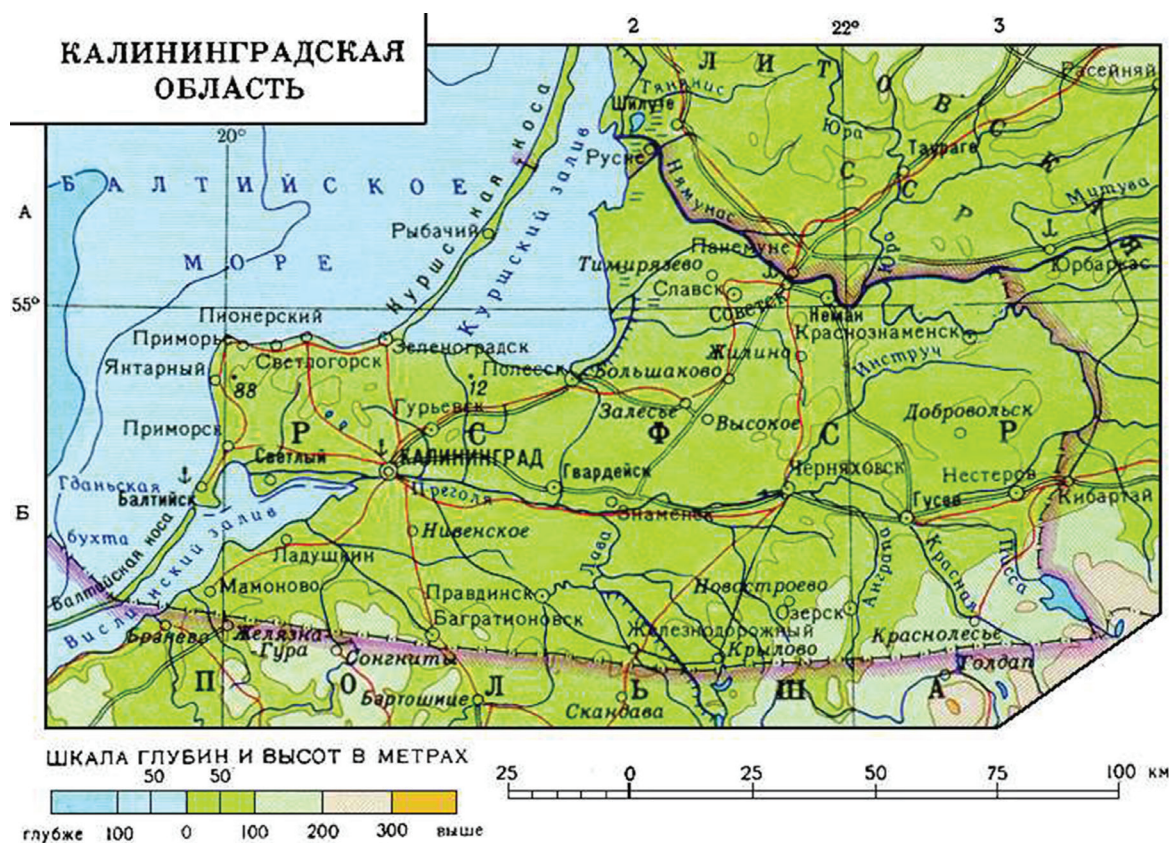


Рис. 1. Район морских экспериментальных исследований

В научной литературе имеются различные сведения о скорости падения концентрации трассера. Согласно ряду работ, падение концентрации в центре пятна диффундирующей примеси пропорционально времени в третьей степени, согласно другим – пропорционально квадрату времени.

Из анализа собранных данных следует, что скорость падения концентрации примеси в центре пятна пропорциональна времени в степени, значение которой изменяется в довольно широком диапазоне, а именно – от 0,9 до 3,5. В целом проанализированная информация об изменчивости концентрации в прибрежном пограничном слое моря указывает на отсутствие универсальной закономерности. Скорость падения концентрации в облаке примеси в основном зависит от масштаба явления и динамических условий морской акватории, которые различны в каждом конкретном случае.

В исследованиях получена картина распределения концентрации красителя по глубине вдоль генерального направления его распространения. Это обеспечивалось синхронным отбором проб в центре пятна и на его краях с течением времени.

Установлено, что за интервал времени около 4 часов с момента выпуска искус-

ственная примесь в основном располагалась в верхнем пятиметровом слое, а её концентрация уменьшалась в направлении продольного распространения пятна от $5 \cdot 10^{-2}$ до $5 \cdot 10^{-9}$ г·см⁻³. Причём максимальная концентрация трассера отмечалась не на поверхности моря, а на глубинах от 2 до 8 метров. Таким образом, зафиксировано наличие тонкой гидротермодинамической структуры в распределении трассера по вертикали.

Другая важная часть эксперимента заключалась в определении изменения площади пятен красителя во времени. Наблюдения за изменением площади пятен красителя позволили выполнить оценку величин коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии. Считается, что:

$$\kappa_t \approx \frac{dS}{dt},$$

где dS – изменение площади пятна красителя за интервал времени dt .

В опытах облако красителя наблюдалось на поверхности моря около 4-5 часов. За это время горизонтальные размеры пятна красителя достигали размера приблизительно 1000 метров. Поэтому на основании данных экспериментов с флюоресцирующими трассерами мы смогли осуществить оценку коэффициента

горизонтальной турбулентной диффузии для масштабов от десятков до сотен метров.

Полученные нами значения коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии в районе взаимодействия морских и речных вод и его зависимость от масштаба явления приводятся на рисунке 2.

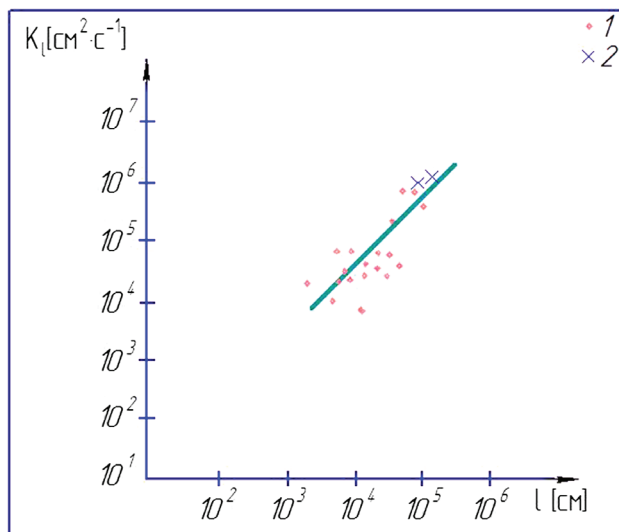


Рис. 2. Значения коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии и зависимость его от масштаба явления, полученные по результатам экспериментов с флуоресцирующими трассерами (1) и инструментальных измерений течения (2) в прибрежной области юго-восточной части Балтийского моря

Выводы

В целом результаты определения коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии согласуются с законом Ричардсона «степени 4/3». Однако полученные значения коэффициента диффузии, составляющие 10^4 - 10^6 $\text{см}^2\cdot\text{с}^{-1}$ примерно на порядок выше, чем для соответствующих масштабов явления других прибрежных акваторий. В данном случае сказываются условия приустьевоего взморья.

Основная причина усиления горизонтальной диффузии, возможно, заключается в механизме растекания менее плотных вод, распреснённых речным стоком, над слоем более солёных морских вод. А именно резко возрастает плотностная устойчивость, вертикальная диффузия ослабляется и вся энергия турбулентности расходуется на горизонтальный обмен. Кроме того, на прибрежном мелководье создаются благоприятные условия для развития турбулентности

за счёт потери устойчивости струи вдольберегового течения, а также из-за более интенсивного разрушения внутренних волн.

В условиях летней стратификации вертикальный обмен ослабляется. Согласно наблюдениям, толщина зоны перемешивания вод над слоем скачка плотности остаётся неизменной в течение длительных интервалов времени. При описанном механизме гидротермодинамического взаимодействия речных и морских вод горизонтальные размеры растекания береговых стоков достигают сотен квадратных километров, что может представлять наибольшую экологическую опасность в ситуации аварийного технологического выброса загрязняющих веществ.

Изложенные в работе сведения дополняют имеющиеся физические представления о взаимодействии потоков вещества и энергии прибрежных акваторий внутренних водоёмов.

Библиографический список

1. Озмидов Р.В., Асток В.К., Гезенцев А.Н., Юхат М.К. Статистические характеристики полей концентрации пассивной примеси, искусственно вносимой в море. // Известия АН СССР. ФАО, 1971. – Т. 7. № 9. – С. 963-971.
2. Путырский В.Е. Гидрофизические аспекты взаимодействия вод суши. – М.: Наука, 1990. – 120 с.
3. Путырский В.Е., Фролов А.П. Процессы формирования ареалов загрязнений в донных осадках (на примере балтийского побережья Калининградской области). // Геоэкология, 2004. – № 2. – С. 122-129.
4. Филатов Н.Н. Некоторые особенности турбулентного обмена в озёрах. Сб.: Изменчивость гидрофизических полей в озёрах. – Л.: Наука, 1978. – С. 88-116.
5. Okubo A.A. Note on horizontal diffusion from an instantaneous source in a nonuniform flow. – «J. Oceanogr. Soc. Japan», 1966, 22. – № 2. – P. 35-40.

Материал поступил в редакцию
09.11.2017 г.

Сведения об авторе

Путырский Владимир Евгеньевич, доктор географических наук, профессор кафедры «Метеорологии и климатологии» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49; e: mail: putyrsky1@yandex.ru; тел.: 8(903)1045701.

V.E. PUTYRSKY

Federal state budgetary institution of higher education «Russian state agrarian university – МТАА», Moscow, Russian Federation

INVESTIGATION OF THE HYDRODYNAMIC INTERACTION OF FLOWS IN THE COASTAL ZONE OF THE INLAND SEA

There are considered processes of the water turbulent exchange when mixing river and sea water. The article discusses the results of experimental studies of water turbulence in the South-Eastern part of the Baltic sea. There are used fluorescent tracers for in situ modeling of the circulation. The coefficient values of horizontal turbulent diffusion which are 104-106 cm²s⁻¹ are calculated depending on the phenomenon scale. There are studied causes of amplification of the horizontal turbulent exchange of water in the areas of pre-estuarial seashore. Conditions of formation of a thin hydro thermodynamic vertical structure of the currents are analyzed.

Mixing of river and sea water, coastal boundary sea layer, turbulent water exchange, circulation, impurity diffusion.

References

1. Ozmidov R.V., Astok V.K., Gezentsvey A.N., Yuhat M.K. Statisticheskie karakteristiki polej kontsentratsii passivnoj primesi, iskusstvenno vnosimoy v more. // Izvestiya AN SSSR. FAO. – 1971. – T. 7, № 9. – S. 963-971.

2. Putyrsky V.E. Gidrofizicheskie aspekty vzaimodejstviya vod sushi. – M.: Nauka, 1990. – 120 s.

3. Putyrsky V.E., Frolov A.P. Protsessy formirovaniya arealov zagryaznenij v donnyh osadkah (na primere baltijskogo poberezhya Kaliningradskoj oblasti). // Geoekologiya. – 2004. – № 2. – S. 122-129.

4. Filatov N.N. Nekotorye osobennosti turbulentnogo obmena v ozerah. Sb.: Izmenchivost gidrofizicheskikh polej v ozerah. – L.: Nauka, 1978. – S. 88-116.

5. Okubo A.A. note on horizontal diffusion from on instantaneous source in a nonuniform flow. – «J. Oceanogr. Soc. Japan», 1966, 22, № 2. – P. 35-40.

The material was received at the editorial office 09.11.2017

Information about the author

Putyrsky Vladimir Evgenyevich, doctor of geographical sciences, professor of the Department “Meteorology and climatology” of the Russian state agrarian University-MAA named after C.A. Timiryazev, Russia, 127550, Moscow, Bolshaya Akademicheskaya, d. 44; e: mail: putyrsky1@yandex.ru; phone: 8 (903) 1045701.

УДК 502/504:69.059.4:699.841

DOI 10.26897/1997-6011/2018-3-63-69

А.В. КЛОВСКИЙ

Открытое акционерное общество «Государственный проектно-конструкторский и научно-исследовательский институт авиационной промышленности», г. Москва, Российская Федерация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

О.В. МАРЕЕВА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ПОВЫШЕННОГО УРОВНЯ ОТВЕТСТВЕННОСТИ ПРИ ПОГРАНИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ СЕЙСМИЧНОСТИ ПЛОЩАДКИ СТРОИТЕЛЬСТВА

Приведены результаты анализа нормативных требований, предъявляемых к методам проектирования объектов повышенного уровня ответственности (класса КС-3) в разные годы. Рассмотрены основные положения Технического регламента о безопасности зданий и сооружений № 384-ФЗ, Градостроительного кодекса Российской Федерации № 190-ФЗ в части требований к обеспечению механической безопасности