

ПРОЦЕССЫ В ГЕОСРЕДАХ

2014
№ 1(1)



Москва

*Научно-образовательный центр
«ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ В ГЕОСРЕДАХ»*

ПРОЦЕССЫ В ГЕОСРЕДАХ

Сборник научных статей

Москва

2014

УДК 531 + 532 + 556 + 550.3 + 550.8

ББК 22.2 + 22.3 + 26.2

Процессы в геосредах: сборник научных статей, Москва: – М.: ИПМех РАН, 2014. – 180 с.

ISBN 978-5-91741-129-3

Сборник научных статей, посвященных результатам работы по программе исследований научно-образовательного центра «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах», созданного на базе Лаборатории геомеханики Института проблем механики Российской академии наук и Отделения геофизики Физического факультета МГУ, а также фундаментальных и прикладных проблем в природных и техногенных системах.

Ключевые слова: геосреды, математическое и лабораторное моделирование, теоретические исследования, неоднородные жидкости, течения в сложных средах.

УДК 531 + 532 + 556 + 550.3 + 550.8

ББК 22.2 + 22.3 + 26.2

Digest of scientific articles devoted to the results of the research program of scientific-educational center «Physical and mathematical modeling of processes in geo-media», created on the basis of the Laboratory of geomechanics Institute for problems in mechanics of the Russian Academy of Sciences and the Department of Geophysics at the Physical faculty of MSU, as well as fundamental and applied problems in the natural and technical systems.

Key words: geo-media, mathematical and laboratory modelling, theoretical studies, inhomogeneous fluids, fluxes in complex media.

ISBN 978-5-91741-129-3

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, 2014

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТУРБУЛЕНТНОГО ОБМЕНА В МЕЛКОВОДНОМ ОЗЕРЕ НЕБОЛЬШОГО РАЗМЕРА

Д.А. Соловьев

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, solovev@ocean.ru

Посредством численных экспериментов с использованием одномерной вертикальной математической модели турбулентных процессов в водоеме и данных натурных измерений исследуется временная изменчивость термогидродинамических полей в модельном водоеме соответствующему мелководному природному озеру относительно небольшого размера. Предложенная в работе методика выполнения численных расчетов позволяет по-новому интерпретировать имеющиеся данные натурных измерений и может быть использована при проведении экологического мониторинга водных объектов.

Ключевые слова: *численное моделирование, конвекция, турбулентность, натурные наблюдения, озеро*

THE NUMERICAL MODELING OF PROCESSES TURBULENT EXCHANGE IN SMALL AND SHALLOW LAKE

D.A. Solovyev

Through numerical experiments using a one-dimensional vertical mathematical model of turbulent processes in the reservoir and field measurement data is investigated temporal variability thermohydrodynamic fields in the model reservoirs corresponding shallow natural lakes of relatively small size. Proposed methodology in performing of numerical calculations allows give a new interpretation existing data and actual measurements and will can be used for environmental monitoring of water bodies.

Keywords: *numerical simulation, convection, turbulence, field observations, lake*

Введение

Процессы турбулентного перемешивания и обмена играют важную роль в функционировании экосистемы практически всех водоемов на Земле. Интерес к этим процессам вызван тем, что в местах их локализации, происходит интенсивная передача количества движения и тепла, распространение пассивных примесей, перенос взвешенных в толще воды частиц и другие подобные явления [9]. Все это естественно оказывает существенное влияние на формирование и пространственную структуру физических, химических и биологических полей в водоеме [10].

Безусловный интерес представляют исследования процессов водообмена с помощью математических моделей, которые могли бы дополнить и помочь в

интерпретации данных проведенных ранее натурных измерений, а так же при анализе различных научных гипотез. Как правило, математическое описание указанных процессов, основано на решении системы уравнений термогидродинамики типа Рейнольдса. При решении таких систем уравнений особое значение приобретает способ задания компонент тензоров кинематического коэффициента турбулентного обмена, а так же скорости диссипации турбулентной энергии.

Основным механизмом генерации энергии турбулентности является деформация вихревых структур, формирующихся при движении в водной среде. Посредством нелинейных взаимодействий крупномасштабные структуры передают часть своей энергии менее крупным структурам и т.д., что

приводит к формированию каскадного механизма передачи энергии. На конечном этапе этого процесса происходит диссипация кинетической энергии мелкомасштабных вихревых структур в тепло. Эти мелкомасштабные структуры являются локально изотропными, т.е. практически не зависят от изменения особенностей режима течений в водоеме, что в значительной мере определяет их роль в переносе тепла и различных примесей внутри водоема. Таким образом, можно говорить об универсальности статистического режима мелкомасштабной турбулентности, который определяется двумя основными размерными параметрами - средней скоростью диссипации турбулентной энергии ε и коэффициентом вязкости ν [7]. Нижнюю границу линейного масштаба турбулентности η_k , можно определить из соотношения Колмогорова $\eta_k = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$, характеризующего размеры вихревых структур на которые вязкость еще оказывает существенное влияние.

Исследования процессов турбулентного перемешивания в озерах проводились в работах [1 – 5, 11, 16 – 18], в том числе на оз. Байкал [4, 5, 19]. Однако большая часть из этих работ относится к исследованию процессов горизонтальной крупномасштабной турбулентности. Кроме того, используемые в ряде указанных работ численные модели имели существенные ограничения в своей реализации, из-за выбора устаревших и не всегда оптимальных методов описания процессов турбулентного переноса.

Цель работы – выполнить численное моделирование турбулентных процессов в модельном водоеме с заданными характеристиками, на основе использования имеющихся данных натуральных измерений. Получаемые результаты численных расчетов предназначены для дополнения и уточнения интерпретации проведенных ранее натуральных измерений. Обсуждение результатов выполненных расчетов проводится с учетом параметров турбулентного обмена и метеорологических условий.

Постановка задачи

В настоящей работе для моделирования процессов турбулентного обмена в водоеме используется Универсальная Модель Океанской Турбулентности (General Ocean Turbulence Model, сокр. GOTM) [12]. Она имеет в своем составе большинство существующих математических моделей турбулентности, которые реализованы в численных алгоритмах программной среды GOTM. Эти модели охватывают широкий диапазон: от исследования простых процессов турбулентной диффузии до сложных моделей с несколькими дифференциальными уравнениями переноса. В GOTM реализованы полуэмпирические модели (на основе метода Рейнольдса), модели баланса турбулентной энергии, 2-х параметрические модели, различные модели k - ε - параметризации и многие другие. Использование GOTM позволят оптимальным образом выбрать метод решения для каждой конкретной задачи.

При расчетах для модели водоема использовалась одномерная 2-х параметрическая модель, т.е. модель, основанная на решении уравнений для вторых моментов, в частности уравнений для кинетической энергии турбулентности и уравнений для напряжений Рейнольдса.

В модели используется уравнения Навье-Стокса (уравнения движения вязкой жидкости в поле силы тяжести) осредненные по Рейнольдсу, где все переменные для случайно изменяющихся характеристик потока представлены в виде суммы осредненных и пульсационных составляющих (обозначены апострофом). Уравнения для средней скорости потока U и средней потенциальной температуры T :

$$\frac{DU_i}{Dt} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \tau_{ij} - g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} - 2\varepsilon_{ijk} \Omega_j U_k,$$

(1)

$$\frac{DT}{Dt} = -\frac{\partial}{\partial x_j} Q_j, \quad (2)$$

где $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + U_j \frac{\partial}{\partial x_j}$, $\tau_{ij} = U'_i U'_j$ –

напряжение трения Рейнольдса, Q – поток тепла, ε_{ijk} – символ Леви-Чивиты, Ω –

угловая скорость вращения Земли, P – давление,

Уравнения для напряжения трения Рейнольдса τ_{ij} и кинетической энергии турбулентности k :

$$\frac{D}{Dt} \tau_{ij} + D_{ij} = - \left(\tau_{ik} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \tau_{jk} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right) + \alpha (g_i Q_j + g_j Q_i) + \Pi_{ij} - \varepsilon_{ij}, \quad (3)$$

$$k = \frac{1}{2} (U_i' U_i')^2, \quad \frac{Dk}{Dt} + \frac{1}{2} D_{ii} = -\tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \alpha g_i Q_i - \varepsilon \quad (4)$$

где Π – тензор корреляции давления и скорости, ε – скорость диссипации турбулентной энергии, α – коэффициент объемного расширения, D – диффузионный член.

Плотность рассчитывается с помощью упрощенного известного международного уравнения состояния морской воды (5), рекомендованного UNESCO [14]. В уравнении состояния считается, что плотность является функцией только температуры:

$$\rho = \rho_0 (1 + 8.0 \cdot 10^{-5} T + 5.88 \cdot 10^{-5} T^2 - 8.11 \cdot 10^{-6} T^3 + 4.77 \cdot 10^{-7} T^4), \quad (5)$$

где $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Полная система уравнений для описания процессов турбулентного обмена помимо (1) – (5) также включает в себя уравнения для потока тепла Q и флуктуаций температуры T' . Для замыкания этой системы уравнений, нужно выразить все неизвестные члены через соответствующий набор определяющих параметров. Это можно сделать различными способами, полный современный набор которых реализован в GOTM. Классическим примером уравнения замыкания можно назвать соотношение Прандтля – Вигхарта $\nu_t = c_\mu k^{1/2} l$ (c_μ – эмпирическая константа, l – интегральный масштаб турбулентности), связывающим коэффициент турбулентной вязкости ν_t и кинетическую энергию турбулентности k [6]. При расчетах в GOTM, был выбран метод вычисления k и l , основанный на решении алгебраических уравнений [12, 13]. Эти уравнение базируется на упрощенной форме уравнения переноса турбулентной энергии, и представляют собой оптимальный выбор с точки зрения скорости проведения численного счета.

В работе проводится исследование турбулентных характеристик на примере озера Вендюрское, которое имеет относительно небольшие размеры по сравнению с крупными озерами (площадью зеркала более 4000 км²). Площадь зеркала озера составляет 10.4 км², объем вод $\sim 54.8 \cdot 10^6 \text{ м}^3$. Озеро принадлежит к бассейну водной системы р. Суны – притока Онежского озера. Выбор данного озера обусловлен тем, что оно является типичным представителем класса мелководных озер водно-ледникового происхождения. Стоит отметить, что в последние десятилетия в бассейне р. Суны произошли значительные хозяйственные преобразования, что, несомненно, сказалось на экосистемах большинства водоемов ее водосбора. Озера такого типа широко распространены в умеренной и субполярной зонах России (в Карелии более 20 % всех озер), США, Канады и скандинавских стран. Озеро Вендюрское расположено в южной Карелии, в 75 – 80 км к Северо – Западу от Петрозаводска (62°10'-62°20' С.Ш., 33°10'-33°20' В.Д.). Средняя глубина озера составляет около 6 м, максимальная – 13.4 м. Исходным материалом для исследования послужили наблюдения, выполненные с 18 по 22 июля 2003 г. в рамках проекта INTAS-01-2132 Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, глубина станции – 8.4 м, координаты станции (62°13'26" С.Ш. 33°16'60" В.Д.). В качестве начальных и граничных условий при расчетах использовались: экспериментально измеренные значения плотности потока коротковолновой солнечной радиации (рис. 1, а); напряжения трения ветра $\tau_w = C_D \rho_a (V)^2$, где C_D – коэффициент трения, ρ_a – плотность

воздуха (рис. 1, б); температуры на поверхности и вблизи дна и толщины квазиоднородного перемешанного слоя (рис. 2, а и б). Неравномерный характер изменения величины h объясняется возможностями измерительной аппаратуры, а так же выбором шага по времени (0.5 ч) между соседними точками фиксации величины h .

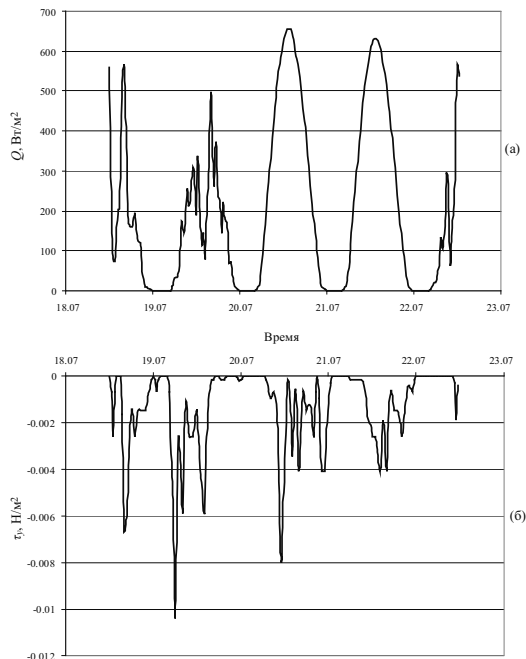


Рисунок 1. Экспериментально измеренные значения потока коротковолновой солнечной радиации Q (а) и напряжения трения ветра τ_v (б) в период с 18 по 22.07.2003 г.

Данные метеонаблюдений температуры и относительной влажности воздуха вблизи поверхности воды используются для расчета явного и скрытого потоков тепла на границе водоем – атмосфера. Потоки явного и скрытого тепла вычисляются с использованием балк – формул [15].

Расчеты проводятся на вертикальной сетке в декартовой системе координат $O(x,y,z)$, составляющей 100 расчетных узлов по глубине водоема z , с шагом по времени 10 с.

Сопоставив данные метеонаблюдений представленные на рис. 1, а и б и рис. 2, б можно отметить, что глубина перемешанного слоя изменяется во времени в зависимости от величины потока тепла через поверхность озера, который

нагревает и остужает поверхностную воду и напряжения трения ветра, совершающего механическую работу необходимую для возникновения турбулентных процессов внутри этого слоя.

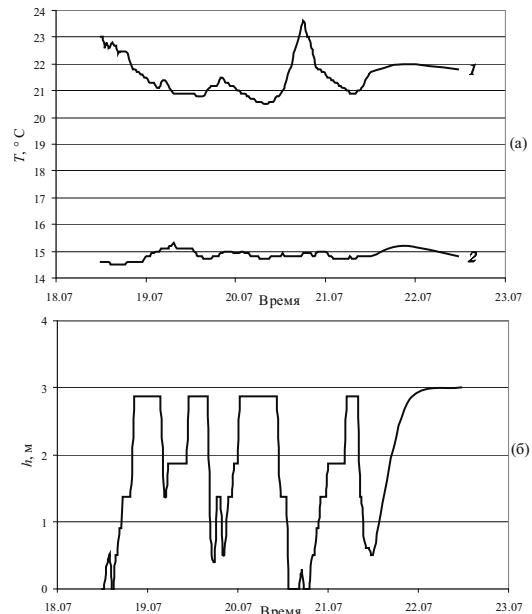


Рисунок 2. Экспериментально измеренные значения температуры (а) толщины перемешанного слоя h (б) в период с 18 по 22.07.2003 г. 1 – температура на поверхности озера, 2 – температура вблизи дна

Турбулентность перемешивает воду в верхних слоях озера и обеспечивает условия способствующие транспортировке тепла вниз, что в свою очередь перемешивает воду в слое всего термоклина.

Результаты математического моделирования

Расчет изменения характеристик турбулентного обмена в верхнем слое озера глубиной $z = 2$ м представлен на рис. 3. Данная область водоема характеризуется максимальной интенсивностью проявления этих характеристик. Анализ суточного изменения коэффициента турбулентной вязкости ν_t (рис. 3, а) показал, что среднее суточное значение этого коэффициента в области однородно перемешанного слоя изменяются в рассматриваемый период времени в пределах 0.00014 до 0.00025 м²/с (табл. 1).

Таблица 1.

Среднесуточные значения ν_t , скорости течений U и скорости ветра V

Дата	Значение	Горизонт, м	$\nu_t, \text{м}^2/\text{с}$	$U, \text{м/с}$	$V, \text{м/с}$
19.07.2003	макс	0.55	0.00025	0.0080	1.16
	мин	1.72	0		
20.07.2003	макс	0.46	0.00018	0.0095	1.15
	мин	1.72	0		
21.07.2003	макс	0.29	0.00014	0.0139	1.06
	мин	1.72	0		

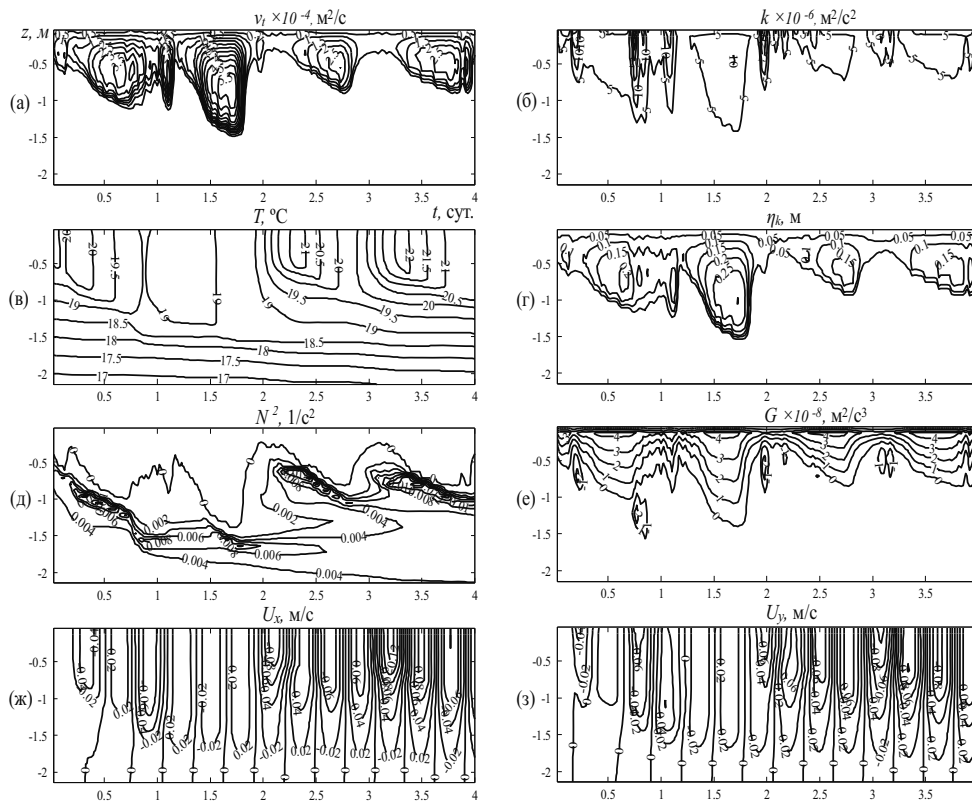


Рисунок 3. Результаты численного моделирования: а – коэффициент турбулентной вязкости ν_t , б – кинетическая энергия турбулентности k , в – температура T , г – масштаб турбулентности η_k , д – частота плавучести N^2 , е – работа против сил плавучести G , ж – скорость U_x , з – скорость U_y

Для наглядного представления о процессах развития мелкомасштабного турбулентного обмена, используются возможности GOTM графического представления данных численного счета следующих характеристик: температуры T (рис. 3, в), масштаба турбулентности η_k (рис. 3, г), частоты плавучести N^2 (частота Брента – Вьяйсяля) (рис. 3, д), работа против сил плавучести G (рис. 3, е) и 2 – х компонент горизонтальной скорости течения U (рис. 3, ж и з). Эти параметры позволяют оценить временную и

пространственную динамику интенсивности турбулентного обмена.

На рис. 2, а четко прослеживается тенденция увеличения температуры, которая на 3 - и сутки достигает своего максимума за время измерения (около 23.5 °C), что качественно соответствует динамике расчетной температуры модели (рис. 3, в). Работа против сил плавучести G (рис. 3, е) подразумевает, что частица, в стратифицированной жидкости перемещаясь, переносит массу из слоя в слой с разными плотностями, изменяя потенциальную энергию столба жидкости,

при этом совершая работу. Эта работа происходит при определенных условиях, в том числе, когда атмосферные характеристики являются благоприятными для конвективного перемешивания (температура воздуха ниже температуры воды и при высокой скорости испарения) и вносит свой дополнительный вклад в производство кинетической энергии турбулентности k . Частота плавучести $N^2 = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}$ (рис. 3, д), характеризует устойчивость стратификации.

При сопоставлении данных метеонаблюдений с данными численного счета (рис. 1, б и рис. 3, а и г) хорошо видно, что при интенсификации ветрового воздействия на поверхность водоема (20.07.2003 г. 11 ч 00 мин) наблюдается заметное увеличение масштаба турбулентности η_k и значения коэффициента турбулентной вязкости ν_t , что подтверждается данными натурных измерений для других водоемов [2, 4, 11].

При суточном осреднении максимальное значение ν_t обычно не превышает 0.00025 (см. табл. 1). Граница, где ν_t достигает своих минимальных значений, близких к нулю пространственно совпадает со средней толщиной перемешанного слоя h (рис. 2, б).

Анализ суточного изменения значений ν_t в верхнем однородно перемешанном слое показал, что они обусловлены в первую очередь, флуктуациями средней скорости течения U , которые в свою очередь напрямую связаны с изменением метеорологических условий и главным образом скорости ветра V . При увеличении ветровой активности ν_t также увеличивается. При этом коэффициент корреляции между этими двумя рядами данных находится в пределах от 0.25 до 0.3.

На рис. 4 приведен пример временной динамики изменения ν_t в зоне однородно перемешанного слоя (горизонт $z = 0.55$ м). Следует отметить, что распределение коэффициента турбулентного обмена неплохо соответствует распределению средней скорости, течений на рассматриваемом горизонте (рис. 4, а и б), при этом величина ν_t в этой области имеет

наибольшее значение, порядка 0.00051 м²/с. Типичное распределение ν_t , средней скорости течения U и скорости диссипации турбулентной энергии ε по вертикали представлено на рис. 5.

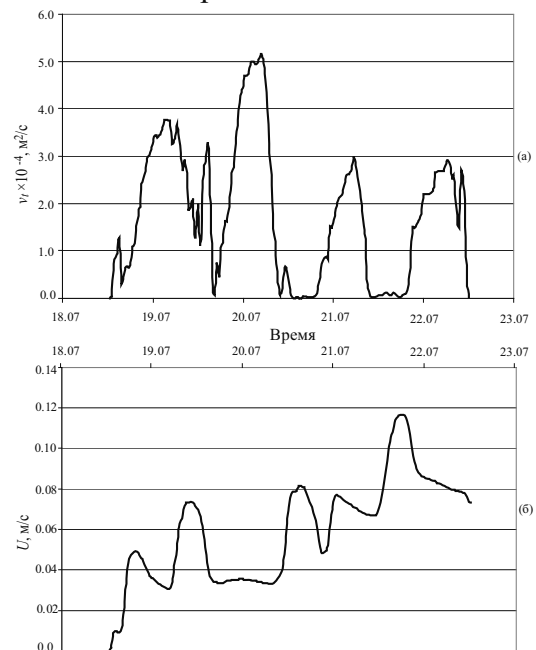


Рисунок 4. Динамика изменения коэффициента турбулентной вязкости ν_t (а) и средней скорости течения U (б) в зоне однородно перемешанного слоя (горизонт $z = 0.55$ м.)

В вертикальном распределении U (рис. 5, б) имеется максимум вблизи поверхности водоема, а минимум приходится на нижнюю границу квазиоднородного перемешанного слоя $z = 2.9$ м.

Скорость диссипации ε (рис. 5, в) в верхнем однородном слое значительно выше, что связано с динамическими и конвективными процессами, локализованными в этой зоне. В придонном слое значения ε минимальны.

Выводы

Анализ натурных данных измерений с использованием возможностей моделирования процессов турбулентного обмена в водоеме программной среды GOTM позволят существенно расширить представления о процессах турбулентного переноса и циркуляции в небольших мелководных водоемах, подобных рассматриваемому в данной работе озеру Вендюрское. Используемая в работе методика получения характеристик

течений, коэффициента турбулентного обмена и скорости диссипации турбулентной энергии может быть в дальнейшем применена при разработке математических моделей циркуляции

водных масс, анализе данных натуральных измерений, а так же при моделировании процессов отвечающих за изменение состава и качества вод.

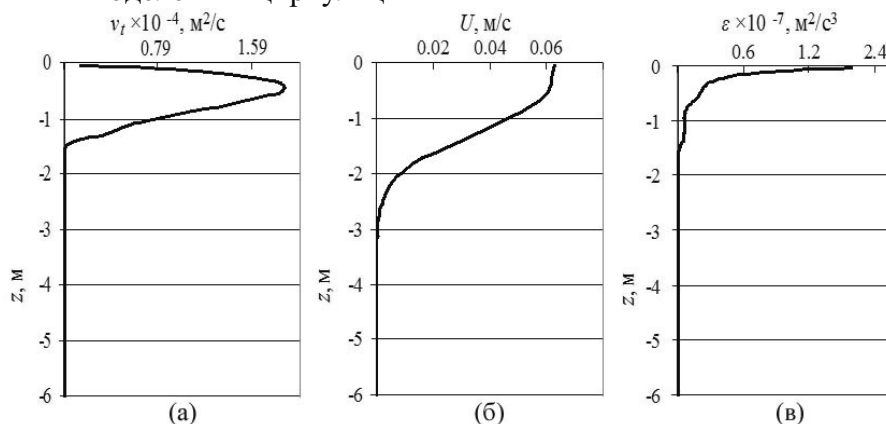


Рисунок 5. Вертикальное распределение коэффициента турбулентной вязкости v_t , средней скорости течения U и скорости диссипации турбулентной энергии ϵ

Прослеживаемая в ходе сравнения данных численного счета связь, между среднесуточными значениями скорости течений и величиной коэффициента турбулентного обмена в зоне перемешанного слоя, отражает анизотропный характер формирования турбулентных явлений в этой зоне. Ниже однородно перемешанного слоя получены результаты, более характерные для изотропных процессов турбулентного обмена. Эти результаты хорошо согласуются с данными натуральных наблюдений [11]. Указанные особенности турбулентного обмена, а так же возможный в рассматриваемый период времени адвективный перенос тепла, связанный с формированием термобарических течений [2], говорят о том, что распространение примесей и антропогенных загрязнений в области однородно перемешанного слоя будет более интенсивным. Это напрямую может оказывать воздействие на формирование и распределение различных

биологических сообществ не только во всей пелагиальной, но и в литоральной области водоема [20]. Так, например, в работе [21] приводятся результаты исследований, которые позволяют говорить о том, что мелкомасштабная турбулентность напрямую влияет на метаболизм рачкового зоопланктона и что это воздействие происходит на тех же временных масштабах, на которых имеет место воздействие турбулентности на его поведение (плавание, питание, реакции).

При численном моделировании турбулентных процессов в водоемах ошибки в задании начальных и граничных условий, а также определении некоторых термодинамических параметров воды могут привести к неадекватному описанию этих процессов. Как показано в настоящей работе, более широкое использование в модельных расчетах данных натуральных измерений в некоторых случаях позволяет избежать таких ситуаций.

Литература

1. *Алексеев Л.П.* Изучение и методы расчета крупномасштабной турбулентности глубоководного водоема Л.: Гидрометеиздат, 1989. 128 с.
2. *Блохина Н.С., Соловьев Д.А.* Влияние ветра на динамику развития термобара в период весеннего прогрева водоема // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. №3. 2006. С.59-63.
3. *Галкин Л.М., Корнейчук А.И.* Прямой метод вычисления компонент тензора коэффициентов турбулентной диффузии. В кн.: Динамика эколого-экономических систем. Новосибирск: Наука, 1981, с.18-31.
4. *Жданов А.А., Гранин Н.Г., Гнатовский Р.Ю., Блинов В.В.* Горизонтальный макротурбулентный обмен и скорость диссипации турбулентной энергии в пелагиали озера Байкал, География и природные ресурсы. №1. 2009. С. 55-60
5. *Знаменский В.А.* К вопросу о процессах внутреннего теплообмена и турбулентности на озере Байкал // Труды Гос. гидр. ин-та. 1973. Вып. 203. С. 71–79.
6. *Латин Ю.В.* Статистическая теория турбулентности (прошлое и настоящее – краткий очерк идей) // Научно технические ведомости (сборник статей Проблемы турбулентности и вычислительная гидродинамика (к 70-летию кафедры «Гидроаэродинамика»)). 2004. №2. с. 35.
7. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. М.: Наука, Ч.1. 1965. 639 с.
8. *Озмидов Р.В.* Горизонтальная турбулентность и турбулентный обмен в океане. М.: Наука, 1968. 200 с.
9. *Поздынин В.Д.* Мелкомасштабная турбулентность в океане / М.: Наука, 2002. 202 с.
10. *Показеев К.В., Филатов Н.Н.* Гидрофизика и экология озер М.: МГУ, 2002. 276 с.
11. *Филатов Н.Н.* Некоторые особенности турбулентного обмена в озерах // Изменчивость гидрофизических полей в озерах. — Л., 1978. — С. 88–116.
12. *Burchard H., Bolding K., Villarreal M.R.* GOTM – a general ocean turbulence model. Theory, applications and test cases, Tech. Rep. EUR 18745 EN, European Commission, 1999.
13. *Cheng Y., Canuto V.M., Howard A.M.* An improved model for the turbulent PBL, J. Atmos. Sci., Vol. 59, 2002. P. 1550–1565
14. *Fofonoff N.P., Millard R.C.* Algorithms for the computation of fundamental properties of seawater, UNESCO technical papers in marine sciences, Vol. 44, 1983. P. 1–53
15. *Kondo J.* Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions, Bound. Layer Meteor., Vol. 9, 1975. P.91–112
16. *Gargett, A. E., Osborn T. R., Nasmyth P. W.* Local isotropy, and the decay of turbulence in a stratified fluid. J. Fluid Mech. Vol. 144, 1984. P. 231–280.
17. *MacIntyre S., Flynn K. M., Jellison R., Romero J. R.* Boundary mixing, and nutrient flux in Mono Lake, California. Limnol. Oceanogr. Vol. 44, 1999. P. 236–242.
18. *Walker S. J., Watts G. R.* A three-dimensional numerical model of deep ventilation in temperate lakes, J. Geophys. Res. Vol. 100, 1995. P. 22711–22731.
19. *Granin N., Thomas M. R., Kocsis O., Wuest A.* Small-scale turbulence and vertical mixing in Lake Baikal Limnol. Oceanogr., Vol. 45(1), 2000. p. 159–173
20. *Румянцев В.А., Дрabbкова В.Г.* Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее. – СПб.: Наука, 2002. 327 с.
21. *Alcaraz M., Saiz E., Calbet A.* Small-scale turbulence and zooplankton metabolism: effects of turbulence on heartbeat rates of planktonic crustaceans. Limnol. Oceanogr., Vol. 39, 1994. P. 1465–1470.