УК 551.510

Одесская школа теоретико-прикладных исследований атмосферного и океанического пограничных слоёв

Шнайдман В.А., д.ф.-м.н., **Степаненко С.Н.**, д.ф.-м.н.
Одесский государственный экологический университет

Проанализировано становление Одесской научной школы физики геофизических пограничных слоев. Описана усовершенствованная модель АПС, предшествующая версия которой успешно используется для параметризации турбулентного обмена в прогностической схеме Российского Гидрометеорологического Центра (ГМЦ). Проанализированы ее достоинства и ограничения.

Началом исследований физики пограничного слоя в Одесском гидрометеорологическом институте (ОГМИ) можно считать опубликованную в 1958 году в “Трудах Главной Геофизической Обсерватории” статью студента ОГМИ В.А. Шнайдмана, основанную на выполненном им дипломном проекте под руководством основоположника теории атмосферного пограничного слоя (АПС) проф. Д.Л. Лайхтмана. После завершения аспирантуры под руководством Д.Л. Лайхтмана В.А. Шнайдман вернулся в ОГМИ, где под его руководством сначала в Проблемной научно-исследовательской лаборатории, а затем на кафедрах «Синоптической и динамической метеорологии» (переименованной затем в «Теоретической метеорологии и метеорологических прогнозов»), «Геофизической гидродинамики и теории климата» была выполнена серия научно-прикладных исследований атмосферного и океанического пограничных слоёв, включая докторские и кандидатские диссертации, магистерские работы и дипломные проекты.

Исследователями Одесской школы исследований пограничного слоя было подготовлено и защищено 4 докторских (Шнайдман В.А., Ле Динь Куанг, Тарнопольский А.Г. и Степаненко С.Н.) и более 60 кандидатских диссертаций, опубликовано более 600 научных статей, включая статьи в таких цитируемых журналах, как Доклады Академии Наук Украины, Известия Академии Наук СССР, Метеорология и Гидрология и др, а также 4 монографии.

Анализируя тенденции развития исследований учёных Одесской школы, следует выделить два основных этапа:

Первый – (1960-1985гг.), на протяжении которого проводилась разработка одномерных моделей атмосферного и океанического пограничных слоёв.

Второй – (с 1985г. по настоящее время), который характеризуется переходом к физико-математическому моделированию трёхмерного геофизического пограничного слоя на основе полной замкнутой системы – уравнений гидротермодинамики с высоким уровнем замыкания турбулентности

Одномерные модели атмосферного и океанического пограничных слоёв, созданные Одесской научной школой, обладали существенным преимуществом по сравнению с моделями, разработанными в Главной Геофизической Обсерватории и в дальнем зарубежье. Так, исследователи Одесской школы отказались от привлечения полуэмпирических соотношений, использованных другими авторами, и сформулировали полную систему уравнений с привлечением физически обоснованной схемы замыкания на основе уравнений баланса кинетической турбулентной энергии и скорости её диссипации [6-15, 17, 19-22, 35].

Как показали результаты расчётов, проведенных по данным наблюдений Первого Глобального Эксперимента Программы Исследования Глобальных Атмосферных Процессов (ПИ-

ГАП), это был существенный прорыв в моделировании вертикальных профилей метеорологических и гидрофизических переменных [2].

Полученные результаты привлекли внимание учёных Мирового Метеорологического Центра (ММЦ), научным руководителем которого был выдающийся гидродинамик И.А. Кибель. Началась многолетняя совместная работа, продолжающаяся и в настоящее время, по использованию моделей Одесской школы для повышения качества воспроизведения вертикального распределения метеорологических величин в нижнем слое атмосферы и усовершенствования численных схем прогноза погоды. Был осуществлён численный прогноз полей давления и геопотенциала для Северного полушария с учётом баротропного пограничного слоя, существенно расширилась выходная информация прогностической модели, необходимая для прогноза мезомасштабных явлений погоды, обслуживания авиации и для расчётов диффузии примесей [1, 3, 21].

Тесное сотрудничество с учёными Института экспериментальной метеорологии (ИЭМ) позволило существенно усовершенствовать методы решения прикладных задач физики пограничного слоя. Привлечение данных наблюдений высотной метеорологической башни позволило рассчитать характеристики пограничного слоя и получить достоверное (в рамках необходимой точности) описание физических механизмов формирования погодных явлений и загрязнения нижнего слоя атмосферы [9, 13-15].

В соответствие с "*Совместной программой мониторинга и оценки переноса примесей на большие расстояния в Европе*" одномерная модель Одесской школы была включена в число рекомендованных Европейской Экономической Комиссией ООН методик для реализации экологического мониторинга и трансграничного переноса загрязняющих веществ [22, 33].

Приложение одномерной модели океанического пограничного слоя к проблемам динамики вод северо-западной части Чёрного моря позволило существенно уточнить экмановскую модель вертикального распределения скоростей течений за счёт учёта вертикальной изменчивости коэффициента турбулентности. [16]

Был разработан метод оценки параметров взаимодействия атмосферного и океанического пограничных слоёв, необходимый для расчёта динамического воздействия атмосферы на поверхность океана [29].

Накопленный опыт работы с одномерными моделями послужил необходимой базой для перехода к количественному описанию трёхмерной структуры атмосферного и океанического пограничных слоёв.

Переход к описанию трёхмерных пограничных слоёв был осуществлён на основе сформулированной концепции *геофизического пограничного слоя*. **Геофизический пограничный слой** (ГПС) – это стратифицированный бароклинный слой жидкости или газа вблизи границы раздела вращающихся сред, структура которого определяется гидродинамикой природных течений. Введение понятия ГПС позволило разработать численные алгоритмы совместного описания атмосферного и океанического пограничных слоёв, при этом выделение каждого осуществляется за счёт введения различных граничных условий. Это позволило существенно ускорить программирование задач атмосферного и океанического пограничных слоёв.

Для количественного описания ГПС была разработана трёхмерная нестационарная модель, включающая эволюционные и диагностические уравнения гидродинамики и схему замыкания турбулентности с помощью двух уравнений для турбулентной кинетической энергии (ТКЭ - b) и скорости диссипации (ε) – так называемое «b-ε замыкание» без привлечения полуэмпирических формул для характерного размера турбулентных вихрей, используемых большинством отечественных и зарубежных авторов.

Использование трёхмерной модели существенно улучшило качество восстановления внутренней структуры ГПС и расширило диапазон решаемых прикладных задач.

Перечислим основные решённые в рамках этого подхода проблемы.

1) Моделирование пространственно-временного распределения метеорологических величин и параметров турбулентности в нижнем слое атмосферы осуществлено с помощью системы краткосрочного прогнозирования погоды, объединяющей схему крупномасштабного прогноза на основных изобарических поверхностях и модель восстановления характеристик детальной внутренней структуры пограничного слоя. Схема крупномасштабного прогноза воспроизводит поля метеорологических величин, используемых в качестве верхнего граничного условия в модели, которая рассчитывает трехмерные поля метеорологических величин в пограничном слое. Таким образом, была разработана система мезомасштабного диагноза и прогноза параметров пограничного слоя по оперативной метеорологической информации. Подчеркнем, что эта модель более физически обоснована по сравнению с аналогичными разработками за рубежом за счёт замыкания с помощью уравнений переноса ТКЭ и скорости диссипации [4, 5, 31, 32, 36, 39, 41-45, 47-52].

2) Впервые с помощью замкнутой системы уравнений пограничного слоя атмосферы дано количественное описание динамики турбулентно-циркуляционных процессов в нижнем слое атмосферы для территории Украины. Весьма перспективным явилось использование разработанного метода моделирования пограничного слоя в задаче трансграничного переноса примесей и проблеме охраны окружающей среды. Для оценки трансграничного переноса траектории упорядоченного переноса частиц, построены по рассчитанным по модели пограничного слоя трёхмерным распределениям скорости ветра. Для этой цели использовалось количественное описание динамики турбулентно-циркуляционных процессов в нижнем слое атмосферы Украине для типовых синоптических ситуаций. Одновременно было произведено моделирование распространения и рассеяния примесей с помощью Гауссовой модели и уравнения турбулентной диффузии [18, 23-28, 33].

Разработана методика и произведено исследование антропогенного воздействия на морскую среду. При этом весьма полезным оказалось введение понятий ближней и дальней зон переноса и рассеяния. Как показал физический анализ, в первой зоне для описания процессов рассеяния примесей необходимо использовать Гауссову модель, а во второй – уравнение турбулентной диффузии. В обеих зонах распределение ветра и параметров турбулентности рассчитывается по усовершенствованной модели ГПС [31, 46].

3) Концепция ГПС использована при разработке нестационарной модели взаимодействия пограничных слоёв океана и атмосферы и моделирования мелководной зоны моря. В разработанной модели параметры термического и динамического взаимодействия двух сред являются внутренними характеристиками и рассчитываются совместно с профилями параметров турбулентности, метеорологическими и гидрофизическими величинами в отличие от большинства моделей, в которых эти характеристики рассчитываются по эмпирическим формулам.

Для описания прибрежной мелководной зоны моря применена разработанная модель шельфового пограничного слоя, в которой в полной мере учтены динамическое воздействие атмосферы, взаимодействие с шероховатым дном и берегом, сгонно-нагонные явления. Последние генерируют значительный наклон свободной поверхности моря, который учитывается геострофическими течениями. Показано, что формирование и учёт геострофических течений за счёт сгонно-нагонных явлений оказался важным механизмом формирования структуры шельфового пограничного слоя и результаты, полученные другими авторами без его учёта, требуют существенного уточнения [51].

Результаты теоретико-прикладных исследований вошли в основные учебные курсы и изложены в опубликованных учебниках [28, 34, 39].

Усовершенствованная модель и результаты расчётов по ней, полученные в последние годы, приводятся далее.

Одним из главных требований, предъявляемых к современным моделям ГПС является описание всего спектра ТКЭ, включающего крупномасштабные вихри, анизотропные вихри

среднего масштаба и изотропные вихри малого масштаба, попадающие в инерционный интервал. Это требование полностью выполняется в разработанной Одесской школой модели ГПС путём явного описания крупных вихрей, параметризацией Смагоринского анизотропных вихрей и замыканием с помощью ТКЭ и скорости диссипации вихрей инерционного интервала.

Разработанная модель ГПС с двумя прогностическими уравнениями для ТКЭ и скорости диссипации, относящая к третьему уровню замыкания, позволила снять существенное ограничение широко используемой схемы замыкания Мэллора-Ямады, связанное с использованием эмпирической формулы для характерного размера вихрей. Это существенно улучшило воспроизведение турбулентного перемешивания в нижнем слое атмосферы на основе исходного объективного анализа и предсказанных крупномасштабных метеорологических полей.

Улучшение качества моделирования АПС потребовало устранение аппроксимации пограничного слоя путём учёта вертикального и горизонтального обмена, введения параметризации членов, описывающих корреляционные моменты давление-скорость, давление-температура в прогностических уравнениях замыкания турбулентности, формулировки прогностических уравнений для приземной температуры и приземной влажности, увеличение полноты описания влияния рельефа.

Моделирование внутренней структуры АПС осуществлено в рамках К-теории турбулентности для нестационарного, стратифицированного бароклинного АПС с использованием декартовой орографической системы координат путём численного решения системы уравнений для осреднённых гидродинамических переменных [38]:

- уравнений движения Рейнольдса

$$\frac{\partial u}{\partial t} + A(u) = -\frac{1}{\rho}\frac{D_{\text{‹}}(p)}{Dx} + f v + \frac{\partial}{\partial \zeta} k \frac{\partial u}{\partial \zeta} + \frac{D_{\text{‹}}}{Dx}\left(k_L D_T\right) + \frac{D_{\text{‹}}}{Dy}\left(k_L D_n\right), \qquad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + A(v) = -\frac{1}{\rho}\frac{D_{\text{г}}(p)}{Dy} - f u + \frac{\partial}{\partial \zeta} k \frac{\partial v}{\partial \zeta} + \frac{D_{\text{г}}}{Dx}\left(k_L D_n\right) + \frac{D_{\text{г}}}{Dy}\left(k_L D_T\right) \qquad (2)$$

- уравнений для температуры и влажности

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + A(\theta) = \alpha_{\tau} \frac{\partial}{\partial \zeta} k \frac{\partial \theta}{\partial \zeta} + \frac{D_{\text{‹}}}{Dx}\left(k_L \frac{D_{\text{‹}}(\theta)}{Dx}\right) + \frac{D_{\text{‹}}}{Dy}\left(k_L \frac{D_{\text{‹}}(\theta)}{Dy}\right) + Lc \qquad (3)$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} + A(m) = \alpha_m \frac{\partial}{\partial \zeta} k \frac{\partial m}{\partial \zeta} + \frac{D_{\text{г}}}{Dx}\left(k_L \frac{D_{\text{г}}(m)}{Dx}\right) + \frac{D_{\text{г}}}{Dy}\left(k_L \frac{D_{\text{г}}(m)}{Dy}\right) - c \qquad (4)$$

- уравнения неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \zeta} = 0 \qquad (5)$$

Здесь используются следующие обозначения для обозначения дифференциальных операторов в используемой орографической системе координат ($\xi = x$, $\eta = y$, $\zeta = z - \Gamma$):

- для операторов горизонтальных пространственных производных

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} + G_1 \frac{\partial \varphi}{\partial \zeta} = \frac{D_r(\varphi)}{D x},$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial y} = \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} + G_2 \frac{\partial \varphi}{\partial \zeta} = \frac{D_r(\varphi)}{D y}, \qquad \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{\partial \varphi}{\partial \zeta}. \tag{6}$$

- для оператора адвекции скалярной величины μ

$$A(\mu) = \frac{\partial u\mu}{\partial x} + \frac{\partial v\mu}{\partial y} + \frac{\partial w\mu}{\partial z} = \frac{\partial (u\mu)}{\partial \xi} + \frac{\partial (v\mu)}{\partial \eta} + \frac{\partial (\tilde{w}\mu)}{\partial \zeta}. \tag{7}$$

- для операторы продольной и поперечной деформации скорости

$$D_T = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{D_r(u)}{D x} - \frac{D_r(v)}{D y},$$

$$D_n = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{D_r(v)}{D x} + \frac{D_r(u)}{D y}. \tag{8}$$

- коэффициенты $G_1(x,y)$ и $G_2(x,y)$ характеризуют уклон рельефа Г.

$$G_1 = -\frac{\partial \Gamma}{\partial x}, \qquad G_2 = -\frac{\partial \Gamma}{\partial y}.$$

В гидростатическом приближении с учетом уравнения гидростатики горизонтальные составляющие градиента давления имеют вид:

$$\frac{D_r(p)}{D s} = \frac{\partial p}{\partial s} + G_s \frac{\partial p}{\partial \zeta} = \frac{\partial p}{\partial s} - G_s \rho g; \qquad s = \{\xi, \eta\}, \quad G_s = \{G_1, G_2\}. \tag{9}$$

Также используются уравнения гидростатики, состояния и Пуассона.

Параметризация турбулентного обмена осуществлена с помощью уравнений для турбулентной кинетической энергии и скорости диссипации с учётом продукции, обусловленной горизонтальным и вертикальным турбулентным обменом, эффектов плавучести, диффузии, рельефа и взаимодействия полей давления и параметров турбулентности:

- уравнение для ТКЭ

$$\frac{\partial b}{\partial t} + A(b) = k\left[\left(\frac{\partial u}{\partial \zeta}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \zeta}\right)^2\right] + k_L(D_S^2 + D_T^2) - \alpha_T \frac{g}{\theta} k \frac{\partial \theta}{\partial \zeta} + \alpha_b \left\{\frac{\partial}{\partial \zeta} k \frac{\partial b}{\partial \zeta} + \right.$$
$$\left. + \frac{D_\Gamma}{D x}\left(k_L \frac{D_\Gamma(b)}{D x}\right) + \frac{D_\Gamma}{D y}\left(k_L \frac{D_\Gamma(b)}{D y}\right)\right\} - \alpha_\varepsilon \frac{b^2}{k} + \Pi_b \tag{10}$$

- уравнение для скорости диссипации

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + A(\varepsilon) = \alpha_1 \frac{\varepsilon}{b}\left\{ k\left[\left(\frac{\partial u}{\partial \zeta}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \zeta}\right)^2\right] + k_L (D_S^2 + D_T^2)\right\} - \alpha_4 \frac{\varepsilon}{b}\frac{g}{\theta} k \frac{\partial \theta}{\partial \zeta} + \alpha_2 \left\{ \frac{\partial}{\partial \zeta} k \frac{\partial \varepsilon}{\partial \zeta} + \right.$$

$$\left. + \frac{D_\Gamma}{D x}\left(k_L \frac{D_\Gamma(\varepsilon)}{D x}\right) + \frac{D_\Gamma}{D y}\left(k_L \frac{D_\Gamma(\varepsilon)}{D y}\right)\right\} - \alpha_3 \frac{\varepsilon^2}{b} + \Pi_\varepsilon \qquad (11)$$

- соотношение Колмогорова-Прандтля

$$k = \alpha_\varepsilon b^2 / \varepsilon, \qquad (12)$$

- формула Смагоринского:

$$k_L = \alpha_L \frac{\Delta s^2}{2}\left(D_T^2 + D_S^2\right)^{1/2}. \qquad (13)$$

Корреляционные члены для давления (Π_b, Π_ε) рассчитываются на основе аппроксимации турбулентной вязкости с применением соотношений Колмогорова-Прандтля и Смагоринского:

$$\Pi_b^{(1)} = \alpha_1 \left\{ k\left[\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial \upsilon}{\partial z}\right)^2\right] + k_L \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + e\left(a_1 \frac{\partial u}{\partial x} + a_2 \frac{\partial v}{\partial y}\right)\right\}.$$

$$\Pi_b^{(2)} = \alpha_2 \frac{k}{Pr}\frac{g}{\theta}\frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad \Pi_b^{(3)} = \frac{4}{3}\varepsilon, \quad \Pi_b = \Pi_b^{(1)} + \Pi_b^{(2)} + \Pi_b^{(3)};$$

$$\Pi_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{b}\Pi_b. \qquad (13)$$

Замкнутая система уравнений пограничного слоя решается при граничных условиях, отражающих влияние внешних воздействий на внутреннюю структуру АПС.

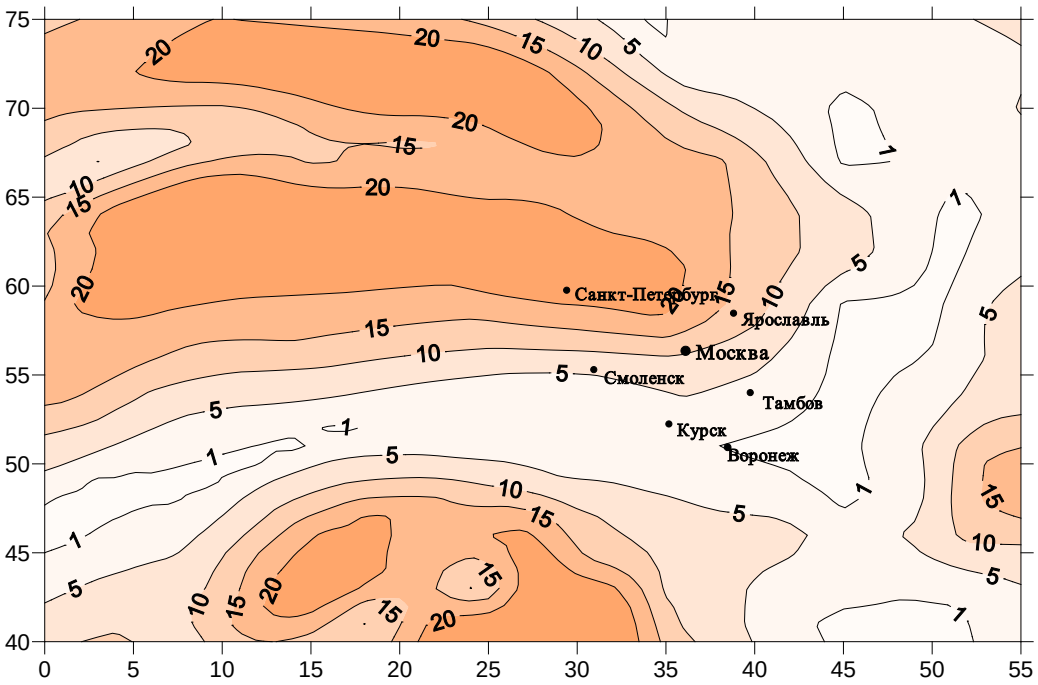
В предложенной конечно-разностной аппроксимации уравнений АПС выполняются законы сохранения количества движения, массы и энергии, а схема интегрирования позволяет использование малых вертикальных шагов, требуемых для разрешения структуры пограничного слоя без существенного уменьшения временного шага.

Традиционно, разработанная модель атмосферного пограничного слоя используется в двух направлениях: во-первых, в прогностической схеме Российского Гидрометеорологического Центра, во-вторых, в задаче восстановления внутренней структуры АПС для задач оценки загрязнения воздуха за счёт выбросов предприятий Украины и трансграничного переноса.

В качестве примера на рис. 1 приводится расчетные прогностические поля коэффициента турбулентности для двух регионов (Европы и США). Расчеты проводились с начальным моментом 00 часов 12 апреля 2005г.

Анализ пространственного распределения вертикального коэффициента (k) турбулентности показал, что в рассматриваемый период вблизи подстилающей поверхности $k < 1$ м^2/с, на верхней границе приземного подслоя ($z \approx 50$ м) коэффициент турбулентного обмена составляет около 12-15 м^2/с, затем он возрастает до 43 м^2/с в слое от 50 до 250 м, выше 250 м до 1500 м уменьшается до 0.1 м^2/с.

(а)



(б)

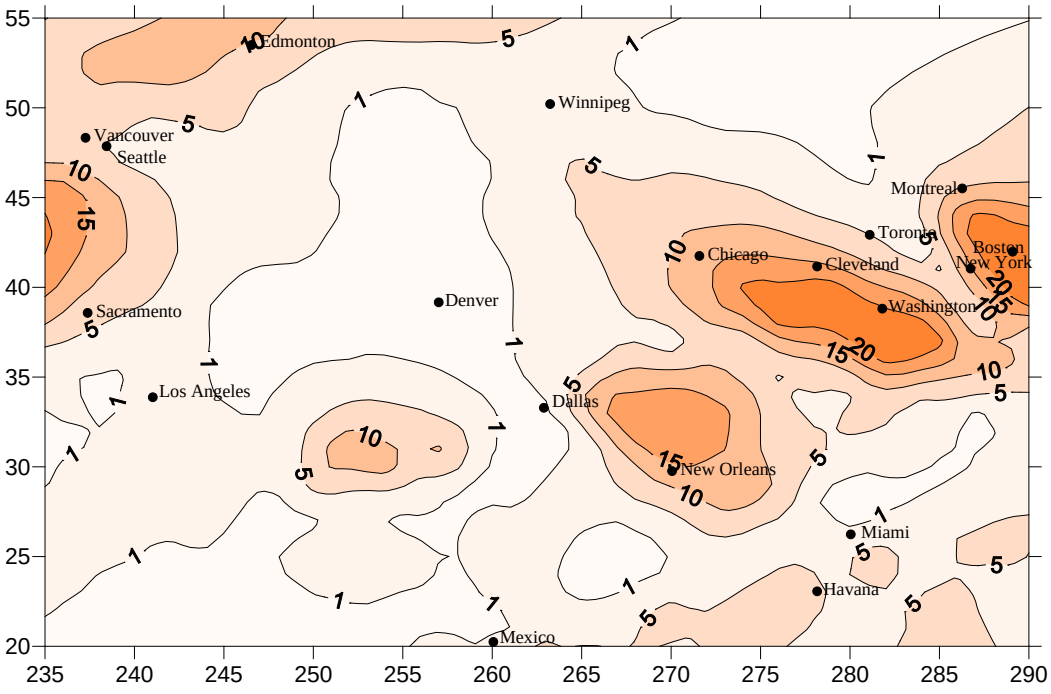


Рис. 1. *Примеры пространственного распределения прогностических значений коэффициента турбулентного обмена* **k** *на уровне 100 м. Прогноз на 24 часа для р-на Европы – рис. (а) и США – рис. (б). По горизонтали – градусы восточной долготы, по вертикали – градусы северной широты.*

Ниже также приведены рассчитанные вертикальные профили характеристик пограничного слоя для сильно неустойчивой (табл.1) и сильно устойчивой (табл.2) термической стратификации. В этих таблицах L, τ - это характерные масштабы длины и времени жизни вихрей.

Таблица 1

Вертикальные профили характеристик пограничного слоя для сильно неустойчивой термической стратификации

Z (м)	dT/dz (град./100м)	V (модуль) (м/с)	k ($м^2/с$)	L (м)	TKE ($м^2/с^2$)	τ (с)	$\varepsilon \times 100$ ($м^2/с^3$)
10	-0.41	7.5	0.3	0.2	1.28	1.0	125.96
30	-1.10	8.6	10.2	5	1.93	56	3.39
50	-1.73	9.6	18.3	9	2.04	100	2.08
100	-2.23	9.8	42.0	18	2.34	190	1.23
200	-2.25	10.8	59.7	40	2.16	273	0.79
300	-2.24	11.0	64.8	47	1.89	320	0.59
400	-2.11	11.4	58.4	47	1.56	332	0.47
500	-2.29	11.9	42.2	38	1.20	300	0.40
600	-2.20	12.4	22.0	25	0.88	220	0.42
700	-1.62	12.9	9.2	11	0.67	162	0.41
800	0.63	13.2	4.9	6	0.59	147	0.40
1000	0.35	13.1	2.3	4	0.38	136	0.28
1200	0.37	12.4	0.3	2	0.04	40	0.10

Таблица 2

Вертикальные профили характеристик пограничного слоя для сильно устойчивой термической стратификации

Z (м)	dT/dz (град./100м)	V (модуль) (м/с)	k ($м^2/с$)	L (м)	TKE ($м^2/с^2$)	τ (с)	$\varepsilon \times 100$ ($м^2/с^3$)
10	-0.71	2.6	0.4	0.4	0.70	8	117.54
20	-0.85	3.4	3.2	3	0.96	33	2.26
30	-0.80	3.8	4.3	4	0.95	45	1.81
40	-0.45	4.0	5.1	5	0.94	54	1.42
50	-0.16	4.2	6.2	7	0.94	66	1.18
100	-0.09	4.6	8.0	9	0.72	110	0.28
150	-0.28	4.9	6.1	12	0.49	124	0.26
200	-0.10	5.1	3.2	7	0.31	103	0.17
250	-0.10	5.4	1.9	7	0.19	100	0.12
300	-0.06	5.8	0.7	4	0.03	23	0.1

В табл.3 приведены осреднённые параметры турбулентности и их пределы для различных диапазонов вертикальных градиентов модуля скорости ветра (δ) и температуры (γ).

Из анализа таблицы 3 следует, что k уменьшаются от 41 $м^2/с$ до 5 $м^2/с$, а ТКЭ – от 1.8 $м^2/с^2$ до 0.3 $м^2/с^2$, когда температурная стратификация переходит от сильно неустойчивой к сильно устойчивой. Когда вертикальные градиенты модуля скорости увеличиваются от 1 м/с на 100 м до 2 м/с на 100 м, то k увеличивается в 3 раза, а ТКЭ – в 2 раза.

Отметим, что весь диапазон масштабов длины лежит в инерционном интервале спектра, что свидетельствует о применимости разработанной модели для описания локально-изотропной турбулентности.

Сопоставление данных объективного анализа и результатов моделирования убеждают, что разработанная модель геофизического пограничного слоя перспективна для решения прикладных задач предсказания погоды, экологии и обслуживания государственного и частного секторов экономики.

Таблица 3

Осреднённые параметры турбулентности и их пределы

	k ($м^2/с$)	L (м)	Пределы		TKE ($м^2/с^2$)	τ (с)	Пределы	
			k	L			TKE	τ
γ (*град/100м*)								
меньше - 2.0	41	33	31÷65	31÷48	1.8	228	1.0÷3.2	250÷310
-1.0 ÷ -2.0	28	24	21÷43	23÷27	1.4	200	0.8÷2.5	172÷262
- 1.0 ÷ 0.0	13	15	6÷20	9÷18	0.6	185	0.4÷0.8	150÷250
больше 0.0	5	9	1÷8	3÷10	0.3	167	0.1÷0.4	100÷200
δ (*м/с на 100м*)								
больше 2.0	30	20	20÷43	17÷24	2.1	143	1.4÷3.2	134÷176
2.0 ÷ 1.0	9	10	5÷22	6÷17	0.9	100	0.6÷1.6	83÷137

Литература

1. Беркович Л.В., Шнайдман В.А. Численный прогноз полей давления и геопотенциала для Северного полушария с учетом баротропного пограничного слоя// Метеорология и гидрология. - 1979. - № 8. - с. 11-24.
2. Беркович Л.В., Фоскарино О.В., Шнайдман В.А. Метод расчета и количественные оценки параметров трехмерной структуры ПСА по данным ПГЭП// Метеорология и гидрология. - 1987. - № 11. - с.57-68.
3. Беркович Л.В., Вейль И.Г., Шнайдман В.А. Расчет вертикальных профилей метеорологических величин в пограничном слое по прогностической информации полусферной модели.- Метеорология и гидрология, 1989. - № 12. - с. 5-12.
4. Беркович Л.В., Тарнопольский А.Г., Шнайдман В.А. Гидродинамическая модель атмосферного и океанического пограничных слоев// Метеорология и гидрология. - 1997. - № 7. - с. 40-52.
5. Беркович Л.В., Тарнопольский А.Г., Шнайдман В.А. Опыт восстановления внутренней структуры атмосферного пограничного слоя по оперативной метеорологической информации// Метеорология и гидрология. - 1998. - № 7. - с. 31-42.
6. Бондаренко В.Н. Сопоставление методик восстановления вертикальных профилей скорости ветра для различных метеорологических условий// Труды ИЭМ. - 1987. - вып. 41 (126). - с. 92-105.

7. Бондаренко В.Н., Шнайдман В.А. Количественное описание приземного слоя в модели пограничного слоя атмосферы// Труды ИЭМ. - 1981. - вып. 27 (100). - с. 12-22.
8. Бондаренко В.Н., Лунина Л.А., Хачатурова Л.М. Структура нижнего слоя атмосферы и расчет профилей метеорологических величин// Метеорология и гидрология. - 1987. - № 10. - с. 39-46.
9. Бондаренко В.Н., Павленко С.В., Шнайдман В.А. Закономерности турбулентного обмена в нижнем 300-метровом слое по данным высотной метеорологической мачты// Труды ИЭМ. - 1987. - вып. 41 (126). - с. 77-91.
10. Борзилов В.А., Шнайдман В.А. Комплекс математических моделей атмосферного распределения и осаждения радионуклидов// Труды Всесоюзной конф. "Радиационные аспекты Чернобыльской аварии". - Обнинск: 1988. - с. 52-64.
11. Боровская Г.А. Количественные характеристики внутренней структуры АПС для типовых синоптических ситуаций на Украине: Дисс... канд. геогр. наук: 11.00.09. - Одесса, 1992. - 210 с.
12. Бродская Н.С., Лосев В.М., Шнайдман В.А. Расчет характеристик пограничного слоя по данным аэросиноптической сети станций в районе г. Москвы// Труды Гидрометцентра СССР. - 1982. - вып. 238. - с. 64-74.
13. Бызова Н.Л., Шнайдман В.А. Классификация профилей вектора ветра в нижнем 300-метровом слое// Метеорология и гидрология. - 1985. - №12. - с. 10-18.
14. Бызова Н.Л., Шнайдман В.А. Расчет вертикального профиля ветра в пограничном слое атмосферы// Метеорология и гидрология. - 1987. - №11. - с.38-47.
15. Бызова Н.Л., Шнайдман В.А., Бондаренко В.Н. Расчет вертикального профиля ветра в пограничном слое атмосферы по наземным данным// Метеорология и гидрология. - 1987. - № 11. - с. 75-83.
16. Лев Т.Д., Талерко Н.Н., Тарнопольский А.Г., Шнайдман В.А. Осаждение загрязняющих веществ из атмосферы на Азовское море и северную часть Черного моря// Метеорология и гидрология. - 1995. - № 6. - с. 40-50.
17. Степаненко С.Н. Инженерная модель расчета вертикальных сдвигов ветра в нижних слоях атмосферы// Прикладные вопросы физики атмосферы. ЛГМИ. - Л.: 1989. - с. 115-121
18. Степаненко С.Н. Динамика турбулентно-циркуляционных и диффузионных процессов в нижнем слое атмосферы над Украиной. - Одесса: Маяк, 1998. - 286 с.
19. Степаненко С.Н., Шнайдман В.А. Сопоставление результатов обобщения экспериментальных данных и расчетов по трехпараметрической модели планетарного пограничного слоя атмосферы// Труды ГГО. - 1983. - вып. 481. - с. 144-151.
20. Степаненко С.Н., Шнайдман В.А. Учет бароклинности в модели ПСА// Прикладные вопросы физики атмосферы. ЛГМИ. - Л.: 1984, с. 42-49.
21. Степаненко С.Н., Павленко С.В., Шнайдман В.А. Расчет интенсивности турбулентности и вертикальных сдвигов ветра на основе теоретической модели пограничного слоя атмосферы// Труды Гидрометцентра СССР. - 1985. - вып. 260. - с. 27-33
22. Степаненко С.Н., Шнайдман В.А. О возможной точности учета эффектов бароклинности при расчете профилей скорости ветра в пограничном слое атмосферы// Труды ГГО. - 1986. - вып. 504. - с. 89-93
23. Степаненко С.Н., Холодов А.Н. Турбулентно-циркуляционный режим пограничного слоя атмосферы над территорией Украины для типовой синоптической ситуации// Метеорология, климатология и гидрология. - 1995. - вып. 32. - с. 83- 90.

24. Степаненко С.Н., Холодов А.Н. Турбулентно-циркуляционный режим пограничного слоя атмосферы при распространении области высокого давления с западных районов Украины. - Одесса, 1995. -24 с.- Деп. в ДНТБ України, 1995, №1421-Ук95 від 02.06. 1995р.
25. Степаненко С.Н., Козаченко И.В. Характеристики орографических вертикальных движений в районе Украинских Карпат// Метеорология, климатология и гидрология. – 1999, вып. 36, с. 3-16.
26. Степаненко С.Н. Метод расчета концентраций примесей в нижнем слое атмосферы от точечного источника// Метеорология, климатология и гидрология. – 1999, вып. 37, с. 118-125.
27. Степаненко С.Н. Математическое моделирование мезомасштабных процессов и явлений в атмосфере. – Одесса: АО «Бахва», 2001, 290 с.
28. Степаненко С.Н.. Лекции по мезометеорологии. Уч. пособие. – Одесса: ТЭС, 2002. - 223 с.
29. Тарнопольский А.Г., Шнайдман В.А. Моделирование взаимодействующих атмосферного и океанского пограничных слоев// Метеорология и гидрология. -1984. -№ 5. - с.48-56.
30. Тарнопольский А.Г., Шнайдман В.А. Моделирование пограничного слоя атмосферы для городской застройки и пригородной зоны// Метеорология и гидрология. - 1991. - №1. - с. 41-47.
31. Тарнопольский А.Г., Шнайдман В.А. Нестационарная модель взаимодействия пограничных слоев океана и атмосферы// Изв. АН СССР Сер. Физика атмосферы и океана. - 1991. - т.27, №12. - с.1349-1357.
32. Тарнопольский А.Г., Шнайдман В.А. Моделирование геофизического пограничного слоя// Докл. АН Украины. - 1993. - № 9. - с. 105-112.
33. Тарнопольский А.Г., Шнайдман В.А. О проблеме трансграничного переноса и турублентного обмена загрязняющих веществ// Докл. АН Украины. - 1995. - № 2. - с. 127-132.
34. Тарнопольский А.Г. Физика пограничного слоя атмосферы. Учебное пособие. – Одесса, ОГМИ, 2001, 156 с.
35. Шнайдман В.А. Вертикальные токи в атмосфере// Метеорология и гидрология. - 1979. - № 9. - с.35-42.
36. Шнайдман В.А. Модель стратифицированного бароклинного пограничного слоя атмосферы, параметризация горизонтального турбулентного обмена и их приложение к решению прикладных задач. Дисс... д-ра. ф.-м. н.: 11.00.09/ Одесса, 1990. -346 с.
37. Шнайдман В.А., Фоскарино О.В. Моделирование пограничного слоя и макротурбулентного обмена в атмосфере. - Л.: Гидрометеоиздат, 1990. - 159 с.
38. Шнайдман В.А., Тарнопольский А.Г. и Степаненко С.Н.. Геофизическая гидродинамика. - Одесса: ОГМИ, 1998. - 301 с.
39. Шнайдман В.А., Беркович Л.В. и Степаненко С.Н. Современные подходы к моделированию атмосферного пограничного слоя в региональных и мезомасштабных прогностических схемах // Український гідрометеорологічний журнал. - 2006 - № 1. с. 33-47.
40. Shnaydman V. and A. Tarnopolsky. Three-Dimensional Structure of Atmospheric Boundary Layer over Limited Area// Res. Activities in Atmos. and Oceanic Modelling, WMO Report No. 23, 1996. - pp. 4.39-4.40.
41. Shnaydman V.A., A.G. Tarnopolsky and L.V. Berkovitch. The method of Atmospheric Boundary Layer Structure Prediction// Res. Activities in Atmos. and Oceanic Modelling, WMO Report No. 25, 1997.

42. Shnaydman V.A. and A.G. Tarnopolsky. The Analysis and Prediction of ABL parameters with the Operative Meteorological Information// Res. Activities in Atmos. and Oceanic Modelling, WMO Report No. 27, 1998.
43. Stepanenko S.N. Method of restoring the atmospheric boundary layer detail three-dimensional structure with the data of routine meteorological information// Res. Activities in Atmos. and Oceanic Modelling, WMO Report No. 25, 1997. - p. 5.41-5.42.
44. Stepanenko S.N. Evaluation of exactitude of restoring of the lower atmosphere circulation structure on the base of a three-dimensional ABL model// Res. Activities in Atmos. and Oceanic Modelling, WMO Report No. 27, 1998. - p. 5.13-5.14.
45. Stepanenko S.N., Snaydman V.A., Marinin I.L. and A.G. Tarnopolsky. The Circulation and Turbulence Structure in Mesoscale Atmospheric Boundary Layer over non-uniform surface// Annales Geophysicae. Part II. Hydrology, Oceans, Atmosphere & Nonlinear Geophysics. European Geophysical Society. Supplement II to Volume 15, 1997.
46. Shnaydman V.A., Tarnopolsky A.G. Research Conception of the Anthropogenic Forcing on Marine Environment// Doklady of NAS Ukraine, No.2, 1999.
47. Shnaydman V.A. Two-equation turbulence closure for quantitative description of the boundary layers. // Research Activity in Atmospheric and Oceanic Modeling, WMO, 2002.
48. Shnaydman V.A. Boundary layer model with two-equation turbulence parameterization, Geophysical Annals// Abstracts of Assemble of AGU and EGS, Nice, 2003.
49. Shnaydman V.A. Parameterization scheme for operational prediction of large-scale processes.// Research Activity in Atmospheric and Oceanic Modeling, WMO, 2004.
50. Shnaydman V.A. Improved hydrodynamical scheme of the turbulence description.// Research Activity in Atmospheric and Oceanic Modeling, WMO, 2004.
51. Shnaydman V.A., Tarnopolsky A.G. Turbulent coastal dynamics. // Research Activity in Atmospheric and Oceanic Modeling, WMO, 2005.
52. Shnaydman V.A., Berkovich L.V. Atmospheric boundary modeling in the numerical prediction operations. // Research Activity in Atmospheric and Oceanic Modeling, WMO, 2006.
53. Shnaydman V.A. Advanced model of atmospheric boundary layer. // Research Activity in Atmospheric and Oceanic Modeling, WMO, 2007.

Odessa scientific school of atmospheric and oceanic boundary layer modeling.

V.A. Shnaydman, S.N. Stepanenko

The 50-year's results of research advances of Odessa scientific school of atmospheric and oceanic boundary layer modeling are presented. The improved model reconstruction of 3D thermo-dynamic and turbulence characteristics in terrain-following coordinates for stratified, baroclinic atmospheric boundary layer is analyzed. The developed model describes the most physical mechanisms of the ABL formation and is implemented in the Russian Hydromet Center's regional prediction model.

Метеорологія, кліматологія та гідрологія, 2008. Вип. 50, частина 1. Стор.4-24.

View publication stats