

Турбулентность и планетарные пограничные слои: природа, теория и место в науках о Земле

С.С. Зилитинкевич

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН; Отделение атмосферных наук
и геофизики Университета г. Хельсинки / Финский метеорологический институт*

Планетарные пограничные слои (ППС) служат связующими звеньями между атмосферой, гидросферой, криосферой и поверхностью суши с ее биосферой и антропосферой. В последнее десятилетие, по мере совершенствования численных моделей отдельных геосфер и, в особенности, объединенных моделей системы климат-биосфера, выяснилось, что традиционные параметризации ППС неплохо воспроизводят турбулентный перенос в слабо стратифицированных среднеширотных ППС, но не пригодны для описания экстремальных режимов, например, в очень устойчивых полярных ППС и конвективных тропических ППС.

Одновременно в исследованиях турбулентности и ППС накоплены свидетельства неадекватности классической теории, трактующей турбулентное течение как суперпозицию упорядоченного среднего движения и чисто хаотической турбулентности; причем турбулентность понимается безоговорочно как результат генерации больших вихрей за счет гидродинамической неустойчивости и прямого каскада кинетической энергии от больших вихрей к меньшим вплоть до её вязкой диссипации. В реальности геофизические турбулентные течения включают не два (среднее течение и турбулентность), а четыре принципиально разных типов движения:

- среднее течение в традиционном смысле этого термина
- истинная турбулентность, т.е. иерархия вихрей убывающего размера с прямым каскадом
- псевдотурбулентность, т.е. иерархия вихрей нарастающего размера с обратным каскадом
- долгоживущие организованные структуры, порождаемые обратным каскадом.

Пересмотр теории с учетом нелокальных механизмов самоорганизации уже осуществляется. На этом пути получен ряд конструктивных результатов, в том числе:

- решение проблемы критического числа Ричардсона в теории турбулентных замыканий – с приложениями к распространению примесей (аэрозолей, парниковых газов и др.)
- нелокальная теория турбулентной конвекции – с приложениями к тепло/массо-обмену, например, над открытой водой в полярных широтах, над городами, в тропиках и т.д.
- обнаружение и нелокальная теория долгоживущих устойчивых ППС, определяющих взаимодействие между атмосферой и гидросферой / криосферой в высоких широтах.

Работа ведется с участием более 20 групп из ЕС, России, США и Израиля. Новые параметризации внедряются в оперативные модели прогноза погоды, загрязнения воздуха и изменений климата в Финляндии (FMI), Дании (DMI), Италии (ENEA) США (San Jose Univ.) – в рамках EU FP7 проектов PBL-PMES (2009-2013), MEGAPOLI (2008-2011) и др.

Модели с новыми алгоритмами для описания турбулентности и ППС, позволят уточнить:

- турбулентные механизмы взаимодействия атмосферы и океана (включая морской лед)
- климатический отклик на изменение аэрозольного состава атмосферы
- изменение микроклимата при смене форм землепользования
- реакцию вечной мерзлоты на потепление климата
- прогноз ряда опасных природных явлений, как например, катастрофических эпизодов загрязнения воздуха (существенно определяемого толщиной ППС).

В дальнейших планах – проверка новых моделей ППС в различных физико-географических условиях и создание географического атласа ППС в интересах землепользования, оценок качества воздуха и прогноза локальных изменений климата.