

САМООРГАНИЗАЦИЯ И НЕЛОКАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ

С.С. Зилитинкевич

SELF-ORGANISATION AND NON-LOCAL FEATURES OF GEOPHYSICAL TURBULENT FLOWS

S.S. Zilitinkevich

Согласно классической парадигме, турбулентное течение рассматривается как суперпозиция организованного среднего движения и хаотической турбулентности, характеризующейся прямым каскадом энергии (от больших вихрей к меньшим), а инструментами моделирования служат турбулентные замыкания, основанные на концепции градиентного переноса, и существенно локальные законы сопротивления и тепло/массообмена. Этот традиционный подход хорошо работает в применении к нейтральным и слабо стратифицированным течениям, но при очень устойчивой и особенно неустойчивой стратификации сталкивается с непреодолимыми трудностями. Геофизические течения, подверженные влиянию стратификации плотности и вращения Земли, почти всегда включают особый тип хаотических движений – обратным каскадом энергии. Последние приводят к самоорганизации в форме вторичных циркуляций, сосуществующих с обычным средним течением, и порождают нелокальные механизмы переноса энергии и вещества. При устойчивой стратификации, типичной для верхней атмосферы, турбулентность существенно взаимодействует с внутренними волнами. Обсуждаются примеры неприменимости классической парадигмы. предложена альтернативная парадигма, включающая обратный каскад, организованные структуры и взаимодействия волн с турбулентностью. На ее основе рассматриваются законы тепло/массообмена, турбулентные замыкания и другие практические аспекты моделирования геофизической турбулентности.

The classical paradigm of the theory of turbulence states that turbulent flow can be considered as a superposition of the fully organised mean motion and fully chaotic turbulence characterised by the forward energy cascade. Accordingly, common tools for modelling geophysical flows are: turbulence closures based on the concept of down-gradient turbulent transport; and essentially local resistance and heat/mass transfer laws. However, in strongly stable and especially in unstable stratification they face insurmountable difficulties. Stratified geophysical flows almost always include a type of chaotic motions characterised by inverse energy cascade and led to development of self-organised, large-scale motions coexisting with usual mean flow and causing non-local effects overlooked in the classical theory. In strongly stable stratification typical of the upper atmosphere, turbulence essentially interacts with internal waves. Examples of principal failure of the classical paradigm are demonstrated, and an alternative paradigm is proposed accounting for organised structures and wave-turbulence interactions as inherent features of geophysical flows. The new paradigm serves as a basis for revision of the currently used heat/mass transfer laws, turbulence closures and other practical aspects of modelling geophysical turbulence.

1. Классическая теория

Теория геофизической турбулентности и планетарных пограничных слоев (ППС) формировалась в течение XX в. в контексте физики атмосферы и океана и общей теории турбулентности одновременно. Определяющая роль стратификации плотности, устойчивой – подавляющей турбулентность или неустойчивой – ведущей к развитию конвекции, а также влияние вращения Земли – главные отличительные черты геофизических течений и ППС (по сравнению с инженерными пограничными слоями).

В первой половине XX в. (до Второй мировой войны) были сформулированы основные понятия и проблемы физики ППС: концепция ППС как турбулентных пограничных слоев во вращающейся жидкости или газе (В. Экман); роль ППС в механизмах общей циркуляции атмосферы и океана (Л. Прандтль, Т. фон Карман, К.-Г. Россби, Дж. Тейлор); вопрос о влиянии стратификации плотности на турбулентность (Л.Ф. Ричардсон); проблема замыкания системы уравнений для статистических моментов турбулентного движения (А.А. Фридман) [Keller, Fridman, 1924; Фридман, 1934].

Формирование зрелой теории геофизической турбулентности и ППС начинается со статей А.Н. Колмогорова [А.Н. Колмогоров, 1941а, б, 1942] и продолжается в течение XX в. совокупными усилиями международного сообщества при значительном вкладе ныне уже покойных учеников Колмогорова: А.М. Обухова, А.С. Монина, А.М. Яглома и

М.Д. Миллионщикова. Современная теория волновой турбулентности основана на работах В.Е. Захарова и его школы [Zakharov et al., 1992].

К концу XX в. теория стратифицированной турбулентности систематизирована¹ и, казалось бы, окончательно сложилась в том смысле, что ее дальнейшее развитие более или менее предопределено в рамках **общепризнанной парадигмы**².

Во-первых, турбулентное течение представляет собой суперпозицию среднего движения, т. е. упорядоченной части движения, которая описывается осредненными уравнениями гидродинамики, и турбулентности, т. е. хаотической части движения, которая описывается методами теории случайных процессов.

Во-вторых, природа турбулентности определяется генерацией больших вихрей из-за неустойчивости среднего движения и прямым каскадом кинетической энергии, т. е. последовательным дроблением вихрей с передачей энергии от больших вихрей к меньшим,

¹Наиболее исчерпывающее и авторитетное изложение механики турбулентности дано в двухтомной монографии Монина и Яглома [Монин, Яглом, 1965, 1967], позднее доработавшейся и переиздававшейся на разных языках: английском (два тома в 1971 и 1973 гг.), японском (четыре тома в конце 70-х годов), русском (два тома в 1992 и 1996 гг.) и, наконец, снова на английском – раздел о гидродинамической неустойчивости, существенно обновленный и пополненный А.М. Ягломом (готовится к выходу в США). Наиболее полный и авторитетный курс метеорологии пограничного слоя принадлежит Дж. Гарратту [Garraff, 1992].

²Термин «парадигма» употреблен здесь в смысле «теории научных революций» Томаса Куна [Кун, 1962].

завершающейся ее вязкой диссипацией (переходом в тепловую энергию) на наименьших вихрях³.

Соответственно этому:

– главными инструментами моделирования турбулентных течений служат чисто локальные концепции: идея градиентного переноса и коэффициентов турбулентной вязкости, теплопроводности и диффузии; теория инерционного интервала в спектре турбулентности; теория подобия Монина–Обухова (в атмосферных моделях);

– практические цели дальнейших исследований сводятся в значительной мере к уточнению знаний коэффициентов турбулентного переноса – в их зависимости от локальных характеристик среднего движения (сдвига скорости и стратификации плотности) и от кинетической энергии турбулентности (КЭТ), определяемой уравнением баланса КЭТ, а также к уточнению сведений об универсальных функциях и безразмерных универсальных константах теории подобия.

Вполне естественно, что парадигма, открывая пути для решения определенного класса проблем, одновременно отсекает проблемы, выходящие за ее рамки. Для приверженцев парадигмы такие проблемы становятся как бы невидимыми; а если их все же поднимают, то они отторгаются как заведомо абсурдные.

2. Сигналы тревоги

В конце 50-х годов XX в. выдающийся климатолог М.И. Будыко, анализируя данные о тепловом балансе земной поверхности, пришел к выводу о необходимости турбулентного (как он полагал) переноса тепла от более холодного слоя атмосферы к более тепловому. Эта идея встретила у физиков абсолютное неприятие и вызвала резкую критику со стороны А.С. Монина – одного из создателей теории геофизической турбулентности. И неудивительно: классические концепции чисто хаотической турбулентности и коэффициентов турбулентной теплопроводности начисто исключают подобный противогradientный перенос. К концу XX века стало ясно, что принципиально прав был Будыко: противогradientный перенос тепла действительно имеет место, например в верхней части конвективных пограничных слоев; но осуществляется он не столько мелкомасштабной турбулентностью (как полагал Будыко), сколько самоорганизованными структурами, т. е. движениями, упущенными в классической теории турбулентности.

Как бы то ни было, именно на теории подобия и коэффициентах турбулентного переноса, определяемых через локальные значения КЭТ, и внешнего масштаба турбулентности основаны алгоритмы ППС, описывающие взаимодействие атмосферы с

земной поверхностью и диффузию примесей в оперативных моделях загрязнения воздуха, прогноз погоды и изменение климата. До недавнего времени эти алгоритмы казались более или менее адекватными общему уровню моделей. Но по мере совершенствования моделей, особенно по мере достижения высокого пространственного разрешения и отказа от гидростатического приближения, традиционные параметризации ППС становятся тормозом дальнейшего прогресса. Главные их недостатки: неприменимость к экстремальным условиям стратификации и к течениям над сложными поверхностями (такими как город, лес, пересеченная местность или штормовое море) – не удается устранить, оставаясь в рамках классической парадигмы, т. е. путем уточнения функций подобия и/или введения дальнейших поправок в традиционные турбулентные замыкания, основанные на КЭТ. Неудивительно, что качество моделирования изменений климата с помощью объединенных моделей атмосфера–гидросфера–криосфера, «склеенных» через ППС, существенно уступает качеству моделирования геосфер в отдельности (см., например, стр. 619 и рис. 8.11 в главе 8 отчета IPCC 4AR). Очевидная причина состоит именно в неудовлетворительной «склейке». Более того, в моделях с пространственным разрешением менее 10 км параметризации турбулентности на основе КЭТ перестают работать. В качестве альтернативы для конвективных ППС предлагается упрощенное вихреразрешающее моделирование [Wyant et al., 2006].

Независимо от этого тревожного сигнала, в исследованиях собственно геофизической турбулентности и ППС накоплены бесспорные свидетельства несоответствий между наблюдаемыми свойствами стартифицированных (как конвективных, так и устойчивых) турбулентных течений и выводами классической теории. Более того, несоответствия вполне могли быть замечены уже в период формирования теории – экспериментальный материал для этого имелся. Однако на фоне триумфальных достижений теории, там где она применялась к турбулентности в нейтрально или слабо стратифицированной жидкости, свидетельства против нее попросту не замечались.

Строго говоря, самоорганизация, не учитываемая в традиционных турбулентных замыканиях, наблюдается и в нейтрально стартифицированных ППС. Течение в ППС испытывает воздействие вращения Земли, влияние которой на турбулентность в некотором смысле подобно действию устойчивой стратификации. Средний профиль ветра (так называемая спираль Экмана) оказывается неустойчивым по отношению к малым возмущениям; причем последние приводят к формированию крупномасштабных спиральных вихрей («роликов»), которые и по наблюдениям, и по вихреразрешающим численным экспериментам осуществляют более 50 % движения (вертикального переноса). Традиционные модели замыкания этот механизм не воспроизводят.

Напомним, что Колмогоров [Колмогоров, 1941а, б, 1942] формулировал свою концепцию прямого каскада и соответственно определяющей роли диссипации КЭТ, включая замыкание, основанное на одном лишь уравнении баланса КЭТ, имея в виду турбу-

³На первый взгляд, идея прямого и только прямого каскада опирается на прочный фундамент второго начала термодинамики. Однако это только на первый взгляд: второе начало формулируется для замкнутой системы и никак не отрицает возможности существования как прямого (порядок → хаос), так и обратного (хаос → порядок) каскадов при общей тенденции к нарастанию хаоса. Идею о самоорганизации как фундаментальном свойстве турбулентности сформулировал Григорян (1980).

лентность в нейтрально-стратифицированной жидкости. А это именно тот тип турбулентных течений, который и по сей день не обнаруживает существенных расхождений с колмогоровским пониманием турбулентности. Распространение идей Колмогорова на стратифицированные среды осуществляли его последователи, сохранив эти идеи в первоизданном виде. В результате долгие годы не замечался обратный каскад (от хаоса к порядку), играющий, как мы знаем сейчас, доминирующую роль в турбулентной конвекции; а в оперативном используемых турбулентных замыканиях было упущено уравнение баланса потенциальной энергии турбулентности (ПЭТ), без которого моделирование сильно устойчивой турбулентности фактически зашло в тупик [Zilitinkevich et al., 2007, 2008].

Яркий пример обратного каскада – развитие турбулентной конвекции в покоящейся жидкости после включения нагрева снизу. На начальном этапе конвективный слой представляет собой быстро разбухающую зону хаотической турбулентности, но затем на фоне хаоса происходит слияние мелких восходящих струек в более крупные, в результате чего развиваются хорошо выраженные организованные структуры, аналогичные ячейкам Бенара (вертикальным струям, окруженным зонами оседания, обнаруженным Бенаром в опытах с вязкой конвекцией еще в конце XIX в.). По-видимому, первым из метеорологов, кто обратил внимание на это явление, был Скворцов [Скворцов, 1947]. Наличие здесь обратного каскада, т. е. передачи энергии от меньших вихрей к большим, и самоорганизации от хаоса к порядку очевидно [Etling, Brown, 1993; Elperin et al., 2002; Morrison et al., 2005; Elperin et al., 2006]. Но «гипноз» классической парадигмы сильнее очевидности: трактовка самоорганизованных конвективных структур как просто очень крупных турбулентных вихрей и попытки их моделирования с помощью аппарата теории случайных процессов продолжают до настоящего времени.

Характерный результат подобного гипноза – подгонка экспериментов под закон конвективного теплообмена, освященный более чем полувековой традицией: число Нуссельта пропорционально числу Рейлея в степени $1/3$. Вера в эту формулу, незыблемую с точки зрения классической теории, подвигала самых добросовестных экспериментаторов на искусственное подавление самоорганизующихся структур в лабораторных опытах, что только и позволяло получать ее «экспериментальное подтверждение». Виртуозные эксперименты подобного рода с конвекцией в жидком гелии докладывал на Ассамблее EGU-2009 К.Р. Сринивасан (K.R. Sreenivasan – в то время генеральный директор Международного центра по теоретической физике имени Абдуса Салама). В природе самоорганизованные структуры практически всегда присутствуют (рис. 1), и именно они служат главным механизмом теплообмена, усиливая его по сравнению с классической формулой на порядок и более (рис. 2).

Самоорганизация проявляется и в очень устойчивой турбулентности в форме так называемых блинов – сплюснутых по вертикали и протяженных по горизонтали, т. е. почти двумерных структур [Laval et al., 2003]. Этот термин предложил О. Фи-

липс в 1965 г. в Москве, познакомившись с русскими блинами в столовой Московского университета в перерыве между обсуждениями сплюснутых структур на Международном симпозиуме по атмосферной турбулентности и распространению радиоволн. В то время блины понимались как объемы, заполненные обычной мелкомасштабной турбулентностью⁴ и окруженные почти ламинарным течением (детальную теорию их эволюции под действием сил отрицательной плавучести разрабатывал Г.И. Баренблатт). С нашей точки зрения, блины могут порождаться в результате двумеризации турбулентных вихрей за счет их сплюсывания силами отрицательной плавучести и последующей самоорганизации через обратный каскад энергии, типичный для двумерной турбулентности. Это фундаментальное свойство двумерной турбулентности обнаружили и исследовали Р.Х. Крейчнан [Kraichnan, 1967], Дж. Бэтчелор, Р.В. Озмидов и др.

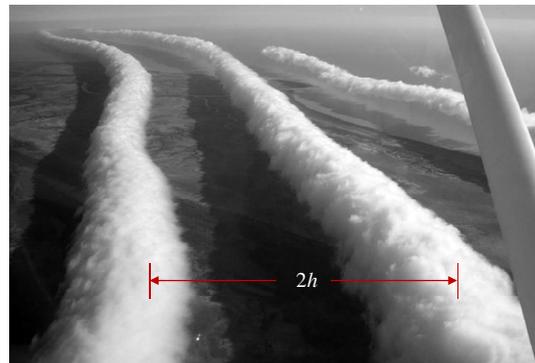
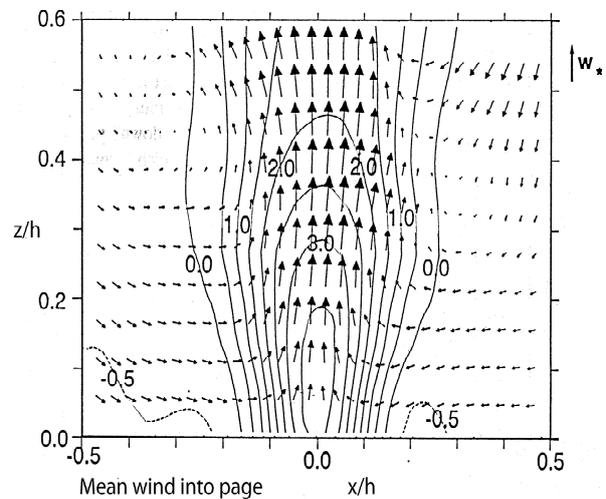


Рис. 1. Примеры самоорганизации турбулентной конвекции. Слева – вертикальное сечение конвективной ячейки над австралийской пустыней при слабом ветре (измерения сделаны при помощи аппаратуры, установленной на борту самолета) [Williams, Hacker, 1992]. Справа – высокоорганизованные роликовые структуры в конвективном пограничном слое, вытянутые вдоль ветра и видимые как «облачные улицы» благодаря конденсации влаги в восходящих движениях воздуха (Queensland, North Coast, Australia, Wikimedia Commons; автор фотографии Mick Petroff). На обоих рисунках $h \sim 10^3$ м – высота конвективного слоя.

⁴Турбулентность в блинах иногда называют «ископаемой турбулентностью» [Gibson, 1999].

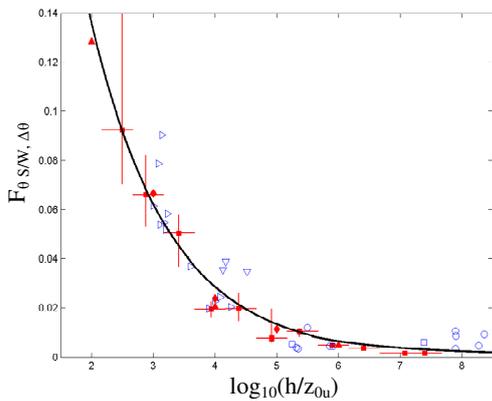


Рис. 2. Коэффициент теплообмена между нагретой поверхностью и атмосферой (отношение потока температуры к произведению конвективного масштаба скорости и перепада температуры) как функция от отношения высоты слоя h к параметру шероховатости поверхности z_0 . По классической теории теплообмен не зависит ни от h , ни от z_0 и над сильно шероховатыми поверхностями недооценивается в десятки раз. Треугольники – наблюдения; крестики – LES; теоретическая кривая рассчитана по нелокальной теории [Zilitinkevich et al., 2006].

3. Альтернативная парадигма

Налицо кризис теории геофизической турбулентности и ППС, требующий пересмотра основной парадигмы (терминология Куна, 1962 г.).

Альтернативная парадигма в сущности уже висит в воздухе⁵. Вряд ли можно отрицать, что геофизические течения жидкости или газа (т. е. стратифицированные течения с очень большими числами Рейнольдса) включают отнюдь не два, а до пяти принципиально разных типов движения:

- среднее движение, понимаемое в традиционном смысле этого термина;
- «обычная» турбулентность, также определяемая традиционно как иерархия хаотических вихрей разного масштаба, характеризующихся прямым каскадом энергии от больших вихрей к меньшим и в конечном счете к вязкой диссипации энергии на мельчайших вихрях;
- внутренние волны, присутствующие при устойчивой стратификации и при вращении, и взаимодействующие с турбулентностью;
- «странная» турбулентность, которую предлагается определить как иерархию сравнительно крупных вихрей, характеризующихся обратным каскадом энергии от меньших вихрей к большим;
- долгоживущие самоорганизованные структуры, поддерживаемые через странную турбулентность путем обратного каскада энергии.

Само по себе явление гидродинамической самоорганизации хорошо известно в метеорологии и физической океанографии⁶. Так, например, кучевое об-

лако при солнечной тихой погоде развивается именно путем слияния мелких конвективных струек, восходящих от нагретой земной поверхности, т. е. путем их укрупнения и организации в крупномасштабную циркуляционную ячейку, состоящую из мощной центральной струи и растекания в стороны на верхней границе ячейки (облако становится видимым благодаря адиабатическому охлаждению поднимающегося воздуха и конденсации содержащегося в нем водяного пара). Разумеется, истинная турбулентность в этой ячейке присутствует, но не она определяет механизм самоорганизации.

Рассматривать кучевое облако как очень большой турбулентный вихрь, т. е. образование хаотической природы, вряд ли кому придет в голову. Однако совершенно аналогичные по своему происхождению и своей топологии долгоживущие конвективные ячейки внутри обычных конвективных ППС до последнего времени трактовались именно как очень большие турбулентные вихри. Неудивительно, что попытки их статистического описания в контексте турбулентных замыканий традиционного типа встречают громадные трудности (обзорная глава в [Zilitinkevich et al., 1999]).

4. Что делать?

Перечисленные выше трудности классической теории в значительной степени вызваны нечеткой трактовкой слова «турбулентность». Чтобы минимизировать изменения терминологии, предлагается сохранить этот термин в его расширенном смысле, а для хаотических вихрей с их тенденцией к разрушению, прямым каскадом энергии и прочими твердо установленными свойствами комоговорской турбулентности использовать термин «обычная турбулентность». Для вихрей, хотя и хаотических, но имеющих тенденцию к слиянию и укрупнению, т. е. к обратному каскаду и самоорганизации, предлагается название «странная турбулентность». Изучение ее природы, в том числе механизмов обратного каскада, представляется физической проблемой перво-степенной теоретической [Elperin et al., 2002, 2006] и технологической важности [Gad-el-Hak, 2000].

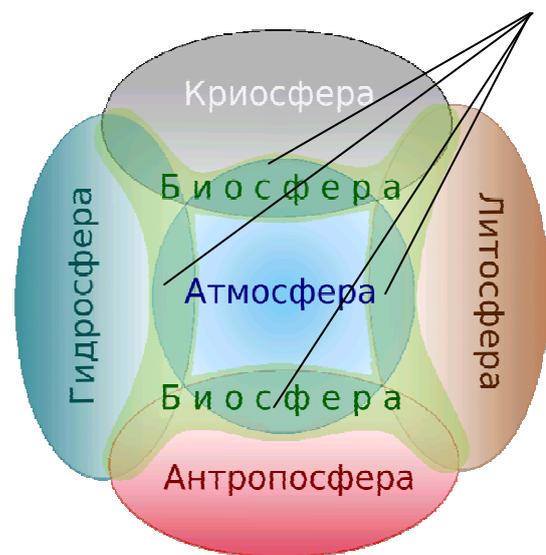


Рис. 3. Взаимодействие геосфер через планетарные пограничные слои (ППС) – области 1 («линзы» на границах раздела). В ППС сосредоточено почти 100 % антропосферы и более 90 % биосферы Земли.

⁵Концептуальный анализ современных представлений о турбулентности, включая аргументы против классической парадигмы, дан в книге А. Цинобера [Tsinober, 2009].

⁶Океанографический пример самоорганизации – так называемая «глубокая конвекция». Организована она совершенно иначе, чем конвекция в атмосфере, вследствие очень малых скоростей движения, при которых сильнейшим образом проявляется вращение Земли. Теория этого вида конвекции заложена Голицыным (1980 г.).

Конечный продукт обратного каскада – самоорганизованные структуры – представляет собой как бы «второй этаж» среднего движения [Григорян, 1980], т. е. вторичные циркуляции, способные, в свою очередь, породить мелкомасштабную обычную турбулентность за счет сдвигов скорости и тем самым усиливать турбулентный перенос в ряде случаев на порядок и более [Hunt, Morrison, 2000; Zilitinkevich et al., 2006]. Учет самоорганизованных структур, а в устойчивой стратифицированных течениях еще и внутренних волн [Zilitinkevich, 2002; Zilitinkevich et al., 2009] необходим для адекватного описания ППС в численных моделях атмосферы и океана.

Последние два десятилетия работы в этих направлениях ведутся, например, в рамках европейского проекта «Атмосферные пограничные слои: физика, моделирование и роль в земной системе» (PBL-PMES, 2009–2013, <http://pbl-pmes.fmi.fi>). С точки зрения наук о Земле главная их цель – создать алгоритмы для реалистического описания ППС как связующих звеньев между геосферами (рис. 3) в многокомпонентных моделях земных систем, в частности в оперативных моделях прогноза погоды, загрязнения воздуха и изменений климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Голицын Г.С. Геострофическая конвекция // Доклады АН СССР. 1980. Т. 251, № 6. С. 1356–1360.

Григорян С.С. Об осреднении физических полей // Доклады АН СССР. 1980. Т. 254, № 4. С. 846–850.

Колмогоров А.Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // Доклады АН СССР, 30, № 4, С. 299–303, 1941.

Колмогоров А.Н. Рассеяние энергии при локально изотропной турбулентности // Доклады АН СССР. 1941. Т. 32, № 1. С. 19–21.

Колмогоров А.Н. Уравнения турбулентного движения несжимаемой жидкости // Изв. АН СССР. 1942. Сер. Физ. Т. 6, № 1, 2. С. 56–58.

Кун Т. Структура научных революций // М.: АСТ, 2003. 605 с.

Монин А.С., Обухов А.М. Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое воздуха // Труды Геофиз. ин-та АН СССР. 1954. № 24 (151). С. 163–187.

Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика // М: Наука, 1965. Т. 1, 639 с.; 1967. Т. 2. 720 с.

Скворцов А.А. Об испарении и обмене в приземном слое атмосферы // Издание Среднеазиатского государственного университета. Ташкент, 1947.

Фридман А.А. Опыт гидродинамики сжимаемой жидкости // Л.-М., 1934.

Elperin T., Kleeorin N., Rogachevskii I., Zilitinkevich S. Formation of large-scale semi-organised structures in turbulent convection // Phys. Rev. 2002. V. 66, 066305. P. 1–15.

Elperin T., Kleeorin N., Rogachevskii I., Zilitinkevich S. Turbulence and coherent structures in geophysical convection // Boundary-layer Meteorol. 2006. V. 119. P. 449–472.

Etling D. and Brown R.A. Roll vortices in the planetary boundary layer: A review // Boundary-Layer Meteorol. 1993. V. 65. P. 215–248.

Gad-el-Hak M. Flow Control: Passive, Active and Reactive Flow Management // Cambridge Univ. Press. London, 2000. 421 p.

Garratt J.R. The Atmospheric Boundary Layer // Cambridge Univ. Press. 1992. 316 p.

Gibson C.H. Fossil turbulence revisited // J. Marine Systems. 1999. V. 21 (1–4). P. 147–167.

Hunt J.C.R., Morrison J.F. Eddy structure in turbulent boundary layers // Eur. J. Mech. B-Fluid. 2000. V. 19. P. 673–694.

Keller L.V., Fridman A.A. Differentialgleichung für die turbulente Bewegung einer kompressiblen Flüssigkeit // Proc. 1st Intern. Congr. Appl. Mech. Delft, 1924. P. 395–405.

Kraichnan, R. H. Inertial Ranges in Two-Dimensional Turbulence // Physics of Fluids. 1967. V. 10. P. 1417–1423.

Laval J.-P., McWilliams J., Dubrille B. Forced stratified turbulence: successive transitions with Reynolds number // Phys. Rev. 2003. V. 68, P. 247–257.

Morrison I., Businger S., Marks F., Dodge P., Businger J.A. An observational case for the prevalence of roll vortices in the hurricane boundary layer // J. Atmos. Sci. 2005. V. 62. P. 2662–2673.

Tsinober A. An Informal Conceptual Introduction to Turbulence // Springer, 2009. 464 p.

Williams A.G., Hacker J.M. The composite shape and structure of coherent eddies in the convective boundary layer // Boundary-Layer Meteorol. 1992. V. 61. P. 213–245.

Wyant M.C., Khairoutdinov M., Bretherton C.S. Climate sensitivity and cloud response of a GCM with a superparameterization // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L06714. doi:10.1029/2005GL025464.

Zakharov V.E., L'vov V.S., Falkovich G. Kolmogorov Spectra of Turbulence I: Wave Turbulence // Springer-Verlag, 1992. 266 p.

Zilitinkevich S. Third-order transport due to internal waves and non-local turbulence in the stably stratified surface layer // Quart. J. Roy. Met. Soc. 2002. V. 128. P. 913–925.

Zilitinkevich S.S., Elperin T., Kleeorin N., Rogachevskii I. Energy- and flux-budget (EFB) turbulence closure model for the stably stratified flows. Part I: Steady-state, homogeneous regimes // Boundary-Layer Meteorol. 2007. V. 125. P. 167–192.

Zilitinkevich S.S., Gryanik V.M., Lykossov V.N., Mironov D.V. A new concept of the third-order transport and hierarchy of non-local turbulence closures for convective boundary layers // J. Atmos. Sci. 1999. V. 56. P. 3463–3477.

Zilitinkevich S.S., Elperin T., Kleeorin N., Rogachevskii I., Esau I., Mauritsen T., Miles M.W. Turbulence energetics in stably stratified geophysical flows: strong and weak mixing regimes // Quart. J. Roy. Met. Soc. 2008. V. 134. P. 793–799.

Zilitinkevich S.S., Elperin T., Kleeorin N., L'vov V., Rogachevskii I. Energy- and flux-budget (EFB) turbulence closure model for stably stratified flows. Part II: The role of internal gravity waves // Boundary-Layer Meteorol. 2009. V. 133. P. 139–164.

Zilitinkevich S.S., Hunt J.C.R., Grachev A.A., Esau I.N., Lalas D.P., Akylas E., Tombrou M., Fairall C.W., Fernando H.J.S., Baklanov A., Joffre S.M. The influence of large convective eddies on the surface layer turbulence // Quart. J. Roy. Met. Soc. 2006. V. 132. P. 1423–1456.

Хельсинский университет, отделение атмосферных наук, Хельсинки

*Институт физики атмосферы РАН им. А.М. Обухова, Москва
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург*