

Памяти выдающегося учёного
Сергея Сергеевича Зилитинкевича

© И. Н. Эзау, 2022

Институт физики и технологии, факультет науки и технологий, Норвежский арктический университет — Университет в Тромсё, 6050 Лангнес, N-9037 Тромсё, Норвегия
E-mail: Igor.ezau@uit.no

XXI-Й ВЕК: СМЕНА ПАРАДИГМЫ В ТЕОРИИ ПЛАНЕТАРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

В начале XXI века Сергей Сергеевич Зилитинкевич выступил инициатором смены фундаментальной парадигмы в теории планетарного пограничного слоя, и шире, в статистической гидромеханике стратифицированных турбулентных течений. Руководя знаменитой кафедрой метеорологии в Университете Уппсалы, Швеция (1998–2003), ему и его сотрудникам удалось органически ввести понятия потенциальной и полной энергии турбулентности и пересмотреть основополагающие представления о турбулентном обмене в стратифицированных течениях. Продолжив работать как профессор-эмеритус в Университете Хельсинки, Финляндия (2004–2021), и привлекая престижные мегагранты в России и Европейском Союзе, он, по сути, создал и возглавил виртуальный международный научно-исследовательский институт — третий институт в своей научной карьере — для проработки теоретических основ и практических приложений, которые вытекали из новой парадигмы энергетики турбулентности. Объединённые им ученые и практики продолжают развивать научное наследие Зилитинкевича в рамках Пан-Евразийского Эксперимента.

Ключевые слова: научное наследие С.С. Зилитинкевича, парадигма в теории турбулентности, теория подобия Монина-Обухова, полная энергия турбулентности, планетарный пограничный слой в климате Земли

© I. N. Esau, 2022

Institute for Physics and Technology, Faculty of Science and Technology, Norwegian Arctic University — University in Tromsø; PO Box 6050 Langnes, N-9037 Tromsø, Norway
E-mail: Igor.ezau@uit.no

XXI-ST CENTURY: A SHIFT OF PARADIGM IN THE PLANETARY BOUNDARY LAYER THEORY

At the beginning of 21st century, Sergej Sergeevich Zilitinkevich initiated a shift of the fundamental paradigm in the planetary boundary layer theory, and wider, in statistical hydromechanics of stratified flows. He held the position of the chair in meteorology at Uppsala University, Sweden in 1998–2003, where he and his colleagues consistently introduced a concept of turbulent potential and total energy and not least reviewed fundamental understanding of turbulent mixing in stratified flows. Zilitinkevich continued as a professor-emeritus at University of Helsinki, Finland, in 2004–2021, where he attracted prestigious mega-grants both in Russia and European Union. As such, he created and led a virtual international research institute — the third institute in course of his carrier in science — for development of theoretical foundations and practical implications of the new paradigm for turbulent energies. A network of researchers and practitioners established by Zilitinkevich continue their joint research in the Pan-Eurasian Experiment frameworks.

Keywords: scientific legacy of S.S. Zilitinkevich, new turbulence paradigm, Monin-Obukhov similarity theory, total turbulent energy, planetary boundary layer in the Earth climate system

1. Введение

Философская теория познания [1] предлагает нам взгляд на научный прогресс как на последовательность революционных сдвигов, ведущих к смене научной парадигмы в понимании объективных закономерностей природы и общества. Смена парадигмы, в широкой или узкой научной дисциплине, происходит не часто. Она совершается не по желанию исследователя, а под давлением накопившихся противоречивых фактов и эмпирических подпорок для общепризнанных, и часто всё ещё хорошо работающих, теорий. В теории геофизических турбулентных течений и планетарных пограничных слоёв (ППС) такая смена научной парадигмы назрела к концу XX-го века. Сергей Сергеевич Зилитинкевич одним из первых осознал необходимость теоретического прорыва в этой области и предложил ясную и вдохновляющую программу для его осуществления.

Ссылка для цитирования: Эзау И.Н. XXI-й век: смена парадигмы в теории планетарного пограничного слоя // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 1. С. 9–18. doi: 10.48612/fpg/ep89-n4z5-g6b6
For citation: Esau I.N. XXI-st Century: a Shift of Paradigm in the Planetary Boundary Layer Theory. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 1, 9–18. doi: 10.48612/fpg/ep89-n4z5-g6b6

Начиная с Льюиса Фрая Ричардсона, Людвиг Прандтля, Теодора фон Кармана и Александра Фридмана (см. [2]), которые работали в 1920-х гг. и базировались на более ранних работах Осборна Рейнольдса, теории пограничных слоёв создавались, следуя парадигме описания коллективного воздействия хаотических возмущений (флуктуаций) потока, вошедших в научную терминологию как «турбулентность» [3], на его, потока, осреднённые по времени, пространству или по статистическому ансамблю характеристики. Таким образом, теория турбулентности создавалась как типичная «эмерджентная» теория — феноменологическая теория систем, которая, наверное, не случайно, начинает развиваться в эти же годы [4, 5]. Исчерпывающее описание классической парадигмы и методов для работы с турбулентными потоками и планетарными пограничными слоями (ППС) дано в труде Монина и Яглома «Статистическая Гидромеханика» [6]. Для прикладных задач продуктивным и широко распространённым подходом стали теория подобия Монина-Обухова (см. обзор в [7]) и построенные на её основе законы сопротивления [8–10]. Теория подобия связала турбулентные потоки момента, тепла и примеси на подстилающей поверхности с изменением осреднённых характеристик скорости и направления течения, температуры (плотности) и концентрации примеси в самом ППС. Здесь и далее мы будем говорить только о задачах, связанных с турбулентным ППС земной атмосферы, для которого скорости течения — это ветер; плотность зависит главным образом от температуры, а граница — это подстилающая поверхность (почва, вода или растительный покров). Заметим при этом, что научные интересы Зилитинкевича гораздо шире искусственно навязанных нами рамок, а его результаты применимы в почти любой области турбулентной гидродинамики, включая классические задачи в теории турбулентности [11] и астрофизики [12, 13].

Возникнув как эмерджентная теория, классическая парадигма, однако, упустила важнейшую эмерджентную составляющую турбулентных течений — самоорганизацию турбулентности, возникновение и развитие так называемых «больших вихрей». Из-за своих размеров большие вихри не рассматривались теориями для бесконечно малых флуктуаций. Эффекты больших вихрей не описывались, а вынуждено заменялись эмпирическими поправками в теориях классической парадигмы [3]. К началу XXI-го века многим специалистам стало очевидно, что эмпирические подпорки для описания турбулентности как результата разрушения всё меньших и меньших вихрей — т.н. прямой каскад энергии — становятся тормозом дальнейшего развития. Во-первых, накопились свидетельства ведущей роли нелокальных взаимодействий в нестратифицированных и устойчиво-стратифицированных ППС. Было показано, что большие вихри из ППС могут производить сразу намного меньшие по масштабу вихри вблизи поверхности, и через это изменяют турбулентные потоки [14, 15]. Было показано, что турбулентные потоки каким-то образом чувствуют особенности стратификации и течения на верхней границе ППС, то есть в свободной атмосфере [16, 17]. Во-вторых, было не ясно каким образом следует учесть генерацию больших вихрей — самоорганизацию турбулентности — в чисто конвективных ППС [3, 18]. Было показано [19, 20], что механизм неустойчивости конвекции Рэлея-Бинара, когда вихри возникают сразу во всём слое, скорее всего неприменим для описания ППС. Требовалось пересмотреть основания теории подобия, или по выражению В.Н. Лыковского «втиснуть» самоорганизацию и нелокальность в формулы теории Монина-Обухова, поняв и математически описав статистические эффекты этих существенно эмерджентных свойств турбулентных систем.

2. Проблема эмпиризма поправочных функций

Эмпиризм поправочных функций кажется, на первый взгляд, незначительным техническим неудобством, мелкой деталью в феноменологической теории турбулентности. При более глубоком рассмотрении, однако, оказывается, что без понимания основополагающих законов, необходимых для описания этих функций, невозможно продвижение в понимании теплообмена в ППС и улучшение моделей погоды и климата.

Не вдаваясь в детали, которые читатель может найти в цитируемых работах, теорию подобия можно суммировать следующими уравнениями

$$\frac{dU}{dz} = \frac{u_*}{kz} \varphi_M \left(\frac{z}{L} \right),$$
$$\frac{d\Theta}{dz} = \frac{\theta_*}{kz} \varphi_H \left(\frac{z}{L} \right),$$

где U — осреднённая скорость ветра, Θ — осреднённая потенциальная температура, u_* — скорость трения, определяемая турбулентными потоками момента, θ_* — турбулентный масштабированный поток температуры на поверхности, z — вертикальная (нормальная к поверхности) координата, и $k = 0,4$ — постоянная Кармана. Градиенты скорости и температуры в ППС взаимосвязаны через масштаб длинны Обухова

$$L = \frac{-u_*^3}{kF_0},$$

где F_0 — поток плавучести. При $L < 0$ температура подстилающей поверхности выше температуры прилегающей жидкости, что создает дополнительную неустойчивость (конвекцию) и турбулентные движения, тепло переносится турбулентностью от поверхности к ППС, выравнивая градиенты средней температуры, скорости и концентрации примеси; при $L \geq 0$, температура подстилающей поверхности ниже температуры прилегающей жидкости, что вынуждает турбулентность затрачивать энергию на перемешивание более холодного, и следовательно более тяжёлого слоя ППС у поверхности, турбулентность угасает и средние градиенты в приповерхностном слое жидкости обостряются. Поправочные функции $\varphi_M\left(\frac{z}{L}\right)$, $\varphi_H\left(\frac{z}{L}\right)$ вводят эти эффекты стратификации в теорию подобия, которая не была предназначена для этого, ибо изначально принималось $\varphi_M\left(\frac{z}{L}\right) = 1$ [2, 3]. Поправочные функции подразумевались эмпирическими [21]. Они понимались как «универсальные» [7, 22], но расхождение с данными наблюдений привело к большому разнообразию таких функций в научной литературе [23–25].

Таким образом, поправочные функции — это подпорки для теорий ППС в общепринятой парадигме. К концу XX-го века был накоплен огромный массив наблюдений, который указывал не только на зависимость поправок от потоков тепла и стратификации в ППС, но и от множества других факторов [26], включая, среди прочего, толщину самого перемешанного слоя, h . Верхняя граница ППС, отделённая от поверхности многими сотнями метров, могла влиять на приповерхностные потоки только через большие, захватывающие весь ППС, вихри [3, 16, 17]. Это делало поправки, зачастую, очень сложной подгоночной конструкцией типа $\varphi_M\left(\frac{z}{L}, \frac{z}{h}, \dots\right)$, которая хорошо работала для одних случаев, но приводила к ещё более значительным ошибкам для других, казалось бы, подобных случаев. Уточнение и сравнение поправочных функций [25, 27, 28] стало столь же распространённой сколь и малополезной практикой в исследованиях и моделировании ППС. Назрел кризис парадигмы. Переосмысление накопленных знаний стало необходимым условием для дальнейшего прогресса.

3. Смена парадигмы: Научная программа для кафедры метеорологии в Упсале

К 1999-му году, когда я начал учиться и работать у Сергея Сергеевича, Зилитинкевича уже достаточно ясно представлял себе связь между проблемой больших вихрей (самоорганизацией турбулентности) в ППС и нелокальными эффектами в турбулентных потоках. Толщина ППС, h , уже рассматривалась как важнейший параметр турбулентного перемешивания и формирования бюджета тепла на подстилающей поверхности. Об этом говорят его работы [29–31], которые мне было предложено освоить прежде, чем перейти к изучению турбулентности с помощью вихре-разрешающей модели (в англоязычной терминологии — large-eddy simulation model). Понимание необходимости и перспектив вихре-разрешающего моделирования турбулентности резко отличало подход Зилитинкевича от работ большинства исследователей атмосферной турбулентности того времени. Научное сообщество пока ещё было сосредоточено на изучении локальной, приповерхностной турбулентности, всех этих отклонений от $\frac{z}{L}$ — зависимостей, предложенных ещё Мониним и Зилитинкевичем [8] (см. также обзор в [9]). Измерять турбулентность на верхней границе ППС умели плохо, с большими неопределённостями и очень фрагментарно во времени и пространстве. Данных современных компьютеризированных содаров, лидаров, дронов и массивов термоанемометров ещё не было.

Мой научный руководитель только что получил руководство знаменитой кафедрой метеорологии и звание полного профессора в университете города Упсала, Швеция. Друзья и коллеги в этот момент в шутку звали Зилитинкевича «профессоре» на итальянский манер с ударением на «о». И он вполне подходил к своему званию и положению. Университет Упсалы — старейший университет Швеции, да и всего Европейского севера — это университет, нагруженный традициями. В состав кафедры метеорологии входила сильнейшая группа с давними традициями наблюдательного изучения турбулентности в приземном слое ППС [15, 26, 32]. Добавлю, что полный профессор здесь — это не красивый титул, а значительная самостоятельная должность с большими правами и ответственностью. В то время администрация практически не имела возможности вмешиваться в деятельность кафедр, а наоборот, была обязана помогать этой деятельности. Но и от профессора требовалось соответствовать должности. Требовалось быть лидером не только

в науке, но и в организации исследований. Оценивали не по индикаторам, а по престижу среди коллег, профессоров других кафедр и университетов. Работа на высоком научном уровне предполагает междисциплинарность исследований. Зилитинкевич надеялся, что, соединив теоретические соображения, данные наблюдательной метеорологии и, нового в то время, численного моделирования турбулентности, удастся понять физическую природу поправочных функций, уйти от эмпиризма в описании феноменологических турбулентных эффектов.

Практически сразу по прибытию Сергей Сергеевич изложил мне свою программу по смене научной парадигмы в теории ППС. По его мнению, эта область науки находилась под гипнозом локальной теории турбулентности [33]. Предполагалось, что размер (и путь смещения, l) турбулентных вихрей в устойчиво-стратифицированном ППС, где $L > 0$, мал в сравнении с его толщиной, то есть $l \ll h$. А раз так, то предполагалось заменить, или по крайней мере дополнить, масштаб L , связанный с потоком тепла на поверхности, аналогичным по структуре локальным масштабом Λ , который был бы связан с локальными потоками в тонких прослойках внутри пограничного слоя. Турбулентная природа таких прослоек выяснилась гораздо позднее в работах под общим руководством Зилитинкевича [34]. Преимущество локальной теории заключалось в том, что турбулентные потоки в локальной нормировке становились независимыми от стратификации. Например, турбулентная вязкость, K_M , — один из важнейших параметров в моделях атмосферы и океана — могла быть аппроксимирована просто константой, $\frac{K_M}{\Lambda u_*} = 0,07$. Как это ни удивительно, но никто не заметил того факта, что локальные потоки предлагалось аппроксимировать через эмпирически подобранную функцию толщины пограничного слоя, то есть, например, так $\frac{\Lambda}{L} = \left(1 - \frac{z}{h}\right)$.

Зилитинкевич задался вопросом: «Каким образом локальные, малого масштаба флуктуации в турбулентном пограничном слое могут быть связаны с существенно нелокальным параметром — его толщиной?». В одной из своих работ он размышляет [2]: «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, завершающейся ее вязкой диссипацией (переходом в тепловую энергию) на наименьших вихрях... *Главными инструментами моделирования турбулентных течений служат чисто локальные концепции*: идея градиентного переноса и коэффициентов турбулентной вязкости, ... теория подобия Монина-Обухова. Практические цели дальнейших исследований сводятся в значительной мере к уточнению знаний о коэффициентах турбулентного переноса — в их зависимости от локальных характеристик среднего движения ...», которые определяются уравнением баланса КЭТ, а также универсальными поправочными функциями и константами. Именно постоянное присутствие, а значит и постоянная генерация больших вихрей, рост флуктуаций и соответственно обратный каскад энергии турбулентности, были упущены в локальной парадигме.

4. Рождение теории полной энергии турбулентности

На семинарах в Уппсале, где с 1998 по 2003 г., кажется, побывали почти все значительные учёные с интересами в области теорий ППС, речь почти сразу же зашла об энергетике турбулентных движений. Многие до разговора с Зилитинкевичем не задумывались над основаниями теории подобия и пределах её применимости. Было привычно размышлять в терминах кинетической энергии турбулентности (КЭТ), её продукции и диссипации. На одном из семинаров я осторожно высказал свои соображения по поводу уравнения баланса КЭТ, где, по-моему мнению, содержались лишь одни неизвестные члены и в источниках, и в стоках. Зилитинкевич сначала разбил мои соображения, но потом заметил, что, конечно, перемешивание стратифицированного своя должно изменять и его потенциальную энергию. Законы сохранения требуют, чтобы часть КЭТ не напрямую уничтожалась (диссипировала), а переходила в потенциальную энергию за счет температурных флуктуаций, которую Зилитинкевич назвал потенциальной энергией турбулентности (ПЭС). Дальнейшая разработка требовала коллективных усилий, но многие коллеги, к которым обращался Сергей Сергеевич, отказывались и, наверное, считали бесперспективной или, наоборот, слишком амбициозной такую задачу. Удалось заинтересовать группу Т. Эльперина, Н. Клеорина и И. Рогачевского из университета Бер-Шева, Израиль, которые уже имели некоторые наработки в этом направлении [35].

Ключевую роль в теории полной турбулентной энергии играет турбулентное число Прандля. Его асимптотическое поведение определяется физикой турбулентного перемешивания тепла и момента. Стратификация подавляет вертикальные движения, то есть уменьшает КЭТ. При этом температурные флуктуации могут, наоборот, усиливаться, так как возрастает разница температур соседних слоёв, то есть растёт ПЭТ.

Мы приходим к аналогии с задачей маятника с трением в классической механике. В свою очередь, возрастающая ПЭТ в отдельных областях течения может приводить к столь значительному ослаблению стратификации, что случайные флуктуации сдвига скорости начнут возрастать, порождая спорадическую турбулентность — явление хорошо известное, но остававшееся необъяснённым [32, 36]. Турбулентное число Прандтля связано с поправочными функциями как $Pr = \varphi_H/\varphi_M$ (см., например, [37]). Таким образом, через понимание энергетики турбулентности, физической взаимосвязи КЭТ и ПЭТ, мы получаем возможность вывести из теоретических соображений вид этих функций, а не гадать, мучаясь эмпирическим подбором к размытому облаку наблюдательных данных. Эта связь послужила отправной точкой для размышлений уже целой группы теоретиков, возглавляемой Зилитинкевичем.

Вскоре удалось получить формулы, объясняющие различия в асимптотическом поведении φ_H и φ_M , и тем самым закрыть так называемую проблему «длинных хвостов» [38, 39], когда значительные турбулентные потоки регистрировались даже в сильно стратифицированных ППС [40, 41], что недопустимо в классической парадигме. Приведём формулы для универсальных поправочных функций следуя [42]:

$$\begin{aligned} \varphi_M(\xi) &= 1 + C_{U1}\xi, \\ \varphi_H(\xi) &= 1 + C_{01}\xi + C_{02}\xi^2, \\ \xi = \frac{z}{L_*} &= z \left(\left(\frac{1}{L} \right)^2 + \left(\frac{C_N u_*}{N} \right)^2 + \left(\frac{C_f u_*}{|f|} \right)^2 \right)^{-1/2}. \end{aligned}$$

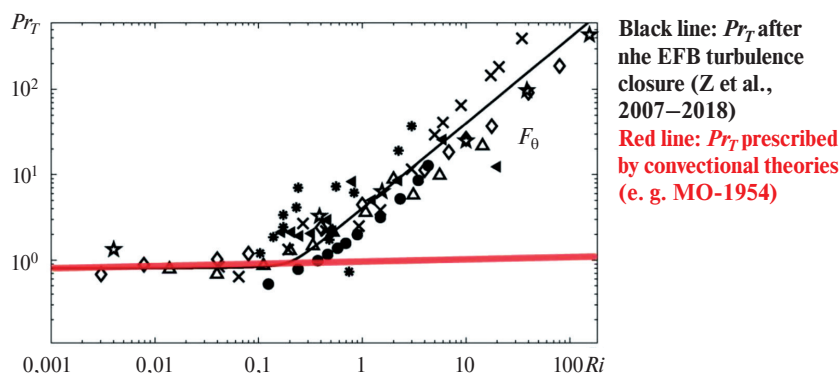
Здесь, константы равны: $C_f = 1$, $C_N = 0,1$, $C_{U1} = 2$, $C_{01} = 1,6$, $C_{02} = 0,2$; N — это частота Брента–Вайсяля; f — параметр Кориолиса. Таким образом, асимптотическое число Прандтля получается равным $Pr = 1 + 0,1e$ (рис. 1).

У этой статьи очень короткая и чёткая аннотация: «В этой работе мы пересматриваем теорию подобия для устойчиво-стратифицированных атмосферных пограничных слоёв; формулируем аналитическое решение для профилей скорости ветра и потенциальной температуры для всей толщины ППС; проверяем наше решение, используя данные вихреразрешающей модели и наблюдений; и развиваем улучшенную технику вычислений потоков у поверхности для использования в моделях прогноза погоды». Сергей Сергеевич вообще уделял всё больше внимания ясности и краткости изложения в своих последних работах. «Мы конкурируем с тысячами информационных источников за внимание научного сообщества», — сообщил он мне, отвечая на вопрос о смысле таких затрат времени и труда на подготовку текста, и продолжил: «Даже выдающееся, но плохо написанная, работа останется незамеченной, а значит, и труд наш попросту пропадёт».

Prandtl no. Pr_T vs. Richardson no. Ri

K-1941, MO-1954 ignore self-control of heat flux, F_θ , and suggest the similar viscosity and conductivity: $Pr_T = K_M/K_H = constant$

This suggests erroneous turbulence cut off at $Ri > Ri_c = 0,25$



Black line: Pr_T after the EFB turbulence closure (Z et al., 2007–2018)

Red line: Pr_T prescribed by convection theories (e. g. MO-1954)

Рис. 1. Одна из презентаций С.С. Зилитинкевича, объясняющая связь между энергетикой турбулентности, турбулентным числом Прандтля и поправочными функциями. Красной линией представлена традиционная парадигма; чёрной линией и символами представлены, соответственно, новая парадигма и фактические данные. Презентация доступна по адресу <https://www.sanu.ac.rs/> (дата обращения: 10.12.2021)

Понимание связи между ПЭТ, КЭТ и большими, сравнительно долгоживущими вихрями, пришло не сразу. Моим первым заданием было построить трехмерную численную модель пограничного слоя атмосферы, которая бы позволила смоделировать и изучить структуру турбулентных флуктуаций и их чувствительность к устойчивости ППС. Такие модели уже существовали, но работали они только для конвективных и нестратифицированных течений. Вскоре выяснилось, что требуется переписать модель заново с использованием схем, сохраняющих энергию, и с применением нового динамического турбулентного замыкания [43]. Это заняло немало времени. Теоретические же выкладки требовали экспериментальной проверки, а данные наблюдений оставались противоречивыми.

Как выяснилось впоследствии, многие противоречия возникли из-за желания экспериментаторов втиснуть наблюдения в классическую парадигму, то есть большой массив данных попросту выбраковывался ещё на этапе первичного контроля качества. Сергей Сергеевич использовал все свои незаурядные организаторские способности для вовлечения в работу по проверке нелокальных теорий ведущих мировых учёных. Кто только не побывал в Уппсале в эти годы! Особенно интенсивными были дискуссии с Ларри Мартом — ведущим специалистом по наблюдениям за атмосферными пограничными слоями. Ларри тоже чувствовал связь между локальными и нелокальными свойствами турбулентности, но искал причину не во внутренней самоорганизации, а во влиянии внешних факторов таких как местные воздушные течения и неоднородности поверхности [44]. Это было влиятельное и популярное в среде модельеров мнение. Противопоставить этому мнению было пока нечего.

Наконец, в конце 2002-го года, новая вихре-разрешающая модель прошла тесты и заработала. Сразу обнаружилась связь между стратификацией свободной атмосферы (выше ППС) и толщиной ППС. Это была та задача, решение которой без моделирования турбулентных вихрей представлялось практически бесперспективным. К моему сожалению, данные из модели резко разошлись с предсказаниями намеченной теории. Я был расстроен, но всё же решил показать результаты научному руководителю. У меня был довольно пришибленный вид, наверное, когда я докладывал и показывал результаты. Настроение, видимо, передалось и Сергею Сергеевичу — было видно, как он обдумывает не свернуть ли мою работу с моделью и перенаправить усилия на обшёт статистик по измерениям в атмосфере, полученным от Ларри и Уппсальской группы. Неожиданно его настроение резко изменилось. «У тебя модель не подтверждает эту теорию?» — спросил он: «Да она и не должна её подтверждать!». Он принялся с энтузиазмом рассказывать, как уже много лет недоволен этой подгонкой турбулентных потоков, которая полностью игнорирует физику турбулентного обмена. Разброс данных наблюдений был огромен. Лучшее, что удавалось выжать из анализа в атмосферных данных, отражено в совместной публикации Зилитинкевича с экспериментаторами [38]. Мы тут же начали набрасывать новый план расчётов. Требовалось получить данные из более трудной для расчётов области параметров. Спустя несколько недель данные были получены и полностью подтвердили новые теоретические выкладки, хотя и с несколько иными коэффициентами [9, 35, 42, 45–48].

5. Принятие новой парадигмы и включение в климатическую научную повестку

Если идеи учёного опережают своё время, наивно было бы ожидать, что они будут восприняты научным сообществом как говорится с «лёта». Такой разрыв в восприятии имеет неприятные последствия в виде трудностей с публикацией, приводит к отказу в финансировании проектов, и в целом замедляет продвижение в работе. С подобными трудностями столкнулся и Зилитинкевич. Удивительно было наблюдать, что чем больше мы прорабатываем новую теорию, чем больше собираем данных и модельных результатов, чем больше к нам присоединяется коллег из самых разных областей метеорологии, тем больше трудностей возникает с публикацией результатов. Росло и сопротивление большинства участников конференций и семинаров. Казалось, что они теряют ориентацию. Дело развития и уточнения парадигмы, которому они посвятили свою жизнь, после доклада Зилитинкевича при всей его мягкости и обаянии, начинало казаться мелким и второстепенным. Это вызывало отторжение. Представьте, ваше имя вошло в науку названием какой-нибудь функции или подхода, а оказалось, что они физически бессмысленны. Обсуждая эти трудности, мы к 2005-му году пришли к выводу, что надо менять подачу парадигмы. Нужно показать коллегам, что они могут по-иному взглянуть на свои же результаты. Подходы и формулы могут быть заново интерпретированы и встроены в новую парадигму. Но для этого нужно было и нам взглянуть на парадигму как на часть более широкой научной повестки, то есть обозначить её влияние на более широкие области науки и практики.

К этому времени, видя, что схемы турбулентного перемешивания дают неудовлетворительные результаты, а упомянутые выше многочисленные попытки подобрать наилучшие универсальные поправочные функции безрезультатны, разработчики моделей начали рассматривать турбулентные потоки как под-



Рис. 2. Сергей Сергеевич Зилитинкевич и Георгий Джолов (экстраординарный профессор Университета Претории) открывают международную конференцию «Планетарные пограничные слои в климате Земли», Кейптаун, Южно-Африканская Республика, 2008

гоночные параметры в своих моделях. Например, турбулентная вязкость, а значит и потоки, и толщина ППС, искусственно и значительно завышаются в моделях прогноза погоды [49, 50]. Следуя соображениям Ларри Марта [28, 44], многие авторы объясняли такое завышение необходимостью учёта неоднородностей поверхности и местных течений в параметризации ППС. Такие соображения отчасти справедливы, но не могут объяснить почему ошибки моделей возрастают при усилении устойчивости стратификации ППС. Напротив, Зилитинкевич настаивал, что причина кроется в структуре самой турбулентности.

Между разгромной рецензией на проект по нелокальной метеорологии ППС (2002) и выделением престижного гранта Европейского Научного Центра (Atmospheric planetary boundary layers: physics, modelling and role in Earth system, 2009) прошло 7 трудных лет. Недостатки одного проекта обернулись достоинствами другого. А началось такое превращение с замечания рецензента на нашу работу [9]. Рецензент писал: «Вы рассматриваете такие случаи устойчивой стратификации в атмосфере, которые, наверное, мало кому интересны, встречаются редко, и, по сути, ни на что не влияют в задачах, имеющих хоть какое-нибудь практическое значение». Мы были уверены, что это не так, но что мы могли противопоставить? Схожее замечание приводилось и в рецензии на упомянутый проект по ППС: «Проект имеет слабую связь с реальными задачами метеорологии, которые концентрируются вокруг атмосферной конвекции и её влиянии на климат». Стало очевидным, что без понимания роли стратифицированных ППС и эффектов толщины ППС в задачах изменения климата работа Зилитинкевича не будет полноценно воспринята научным сообществом.

Зилитинкевич не в первый раз обращался к проблемам ППС и климата, но сейчас требовался свежий взгляд. Понимание роли турбулентного перемешивания в процессах формирования и отклика климата Земли привело С. Манабе и К. Хассельмана к Нобелевской премии по физике в 2021 г. Но нобелевские лауреаты рассматривали только конвективные ППС в атмосфере и океане соответственно. А сейчас требовалось указать на роль устойчивой стратификации. Простой расчёт показывал [51, 52], что асимметрия в климатическом отклике температуры у поверхности формируется разницей в толщине дневного (конвективного) и ночного (устойчивого) ППС. Простыми словами, тепло, подводимое к более тонкому слою, нагревает его быстрее и на большую величину. Дальнейшая работа требовала компьютерных расчётов и глубокого статистического анализа. Эту работу выполнял я со своими сотрудниками в Нансен Центре (Берген, Норвегия). В те годы и Хассельман и Зилитинкевич оба были совместителями в нашем институте. Встречаясь иногда в Бергене, мы вчетвером, включая Ричарда Дэви, обсуждали перспективы этой работы. Результатом явились публикации [53, 54], показывающие, что устойчивая стратификация имеет решающее значение на усиление глобального потепления в районах с преобладанием тонких ППС, наиболее заметно в Арктическом усилении и в температурных рекордах последних лет. Параллельно другая группа в университете Хельсинки разрабатывала влияние стратифицированных ППС на городской климат [55].

6. Вместо заключения

Получение гранта Европейского Научного Центра (2009), который был целиком направлен на изучение фундаментальных свойств нелокальной турбулентности, причём не только в ППС, оказалось средством создания широчайшей сети международной научной кооперации. В каком-то смысле это был виртуальный научный институт, возглавляемый и направляемый Зилитинкевичем — третий институт, который он создал в своей жизни. Вскоре к нему прибавилась вполне реальная лаборатория в Институте Прикладной Физики РАН в Нижнем Новгороде, созданная на средства Российского Мегагранта и руководимая Зилитинкевичем и Юлией Троицкой. Самостоятельные и состоявшиеся учёные из Европейских стран, США, Израиля, России и Украины с энтузиазмом трудились, захваченные идеями новой научной парадигмы. Философское предсказание Куна о том, что смена парадигмы подвигнет исследователей по-новому взглянуть на свои результаты и данные, блестяще подтвердилось. Постепенно нарастающая междисциплинарность работ и открытие новых приложений для полученных результатов привели к необходимости организации крупного международного консорциума теоретиков, модельеров и практиков. Усилиями Сергея Сергеевича Зилитинкевича и Маркку Кулмала консорциум приобрёл форму Пан-Евразийского Эксперимента (PEEX) [56], который продолжает свою активную деятельность, развивая научное наследие Зилитинкевича, и в настоящее время (<https://www.atm.helsinki.fi/peex/>).

Литература

1. Кун Т. Структура научных революций. М.: Изд. АСТ, 2003. 605 с.
2. Зилитинкевич С.С. Самоорганизация и нелокальная природа геофизической турбулентности и планетарных пограничных слоев // Геофизический журнал. 2010. Т. 32. С. 169–174.
3. Zilitinkevich S., Kadantsev E., Repina I., Mortikov E., Glazunov A. Order out of chaos: Shifting paradigm of convective turbulence // J. Atmos. Sci. 2021. P. 3925–3932. doi: 10.1175/jas-d-21-0013.1
4. Broad C.D. The mind and its place in nature. London: Routledge & Kegan Paul, 1925. 256 с.
5. Пригожин И. Философия неустойчивости // Вопросы философии. 1991. Т. 6. С. 46–57.
6. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. М.: Наука, главная редакция физико-математической литературы, 1965. 640 с.
7. Foken T. 50 years of the Monin-Obukhov similarity theory // Boundary-Layer Meteorol. 2006. Vol. 119. P. 431–447. doi: 10.1007/s10546-006-9048-6
8. Monin A.S., Zilitinkevich S.S. Similarity theory and resistance laws for the planetary boundary layer // Boundary-Layer Meteorol. 1974. Vol. 7. P. 391–397. doi: 10.1007/BF00240840
9. Zilitinkevich S.S., Esau I. Resistance and heat-transfer laws for stable and neutral planetary boundary layers: Old theory advanced and re-evaluated // Q. J.R. Meteorol. Soc. 2005. Vol. 131. doi: 10.1256/qj.04.143
10. Kadantsev E., Mortikov E., Zilitinkevich S. The resistance law for stably stratified atmospheric planetary boundary layer // Quart. J. Roy. Met. Soc. 2020. doi: 10.1002/qj.4019
11. L'vov V.S., Pomyalov A., Procaccia I., Zilitinkevich S.S. Phenomenology of wall bounded Newtonian turbulence // Phys. Rev., E. 2006. Vol. 73. 016303. P. 1–13.
12. Shakura N.I., Sunyaev R.A., Zilitinkevich S.S. On the turbulent energy transport in accretion discs // Astronomy and Astrophysics. 1978. Vol. 62. 1–2. P. 179–187.
13. Zilitinkevich S.S. Heat transport by the meridional circulation cell and static stability of the atmosphere on a slowly rotating planet // Kosmicheskiye Issledovaniya. 1989. Vol. 27, No 6. P. 932–942.
14. Hunt J.C.R., Carloti P. Statistical structure at the wall of the high Reynolds number turbulent boundary layer // Flow, Turbul. Combust. 2001. Vol. 66. P. 453–475. doi: 10.1023/A:1013519021030
15. Höögström U., Hunt J.C.R., Smedman A.S. Theory and measurements for turbulence spectra and variances in the atmospheric neutral surface layer // Boundary-Layer Meteorol. 2002. Vol. 103. P. 101–124. doi: 10.1023/A:1014579828712
16. McNaughton K.G., Brunet Y. Townsend's hypothesis, coherent structures and Monin-Obukhov similarity // Boundary-Layer Meteorol. 2002. Vol. 102. P. 161–175. doi: 10.1023/A:1013171312407
17. Van de Boer A., Moene A.F., Graf A., Schüttemeyer D., Simmer C. Detection of entrainment influences on surface-layer measurements and extension of Monin-Obukhov similarity theory // Boundary-Layer Meteorol. 2014. Vol. 152. P. 19–44. doi: 10.1007/s10546-014-9920-8
18. Zilitinkevich S.S., Hunt J.C.R., Esau I., Grachev A.A., Lalas D.P., Akylas E., Tombrou M., Fairall C.W., Fernando H.J.S., Baklanov A.A., Joffre S.M. The influence of large convective eddies on the surface-layer turbulence // Q. J.R. Meteorol. Soc. 2006. Vol. 132. P. 1423–1456. doi: 10.1256/qj.05.79

19. Schmidt H., Schumann U. Coherent structure of the convective boundary layer derived from large-eddy simulations // J. Fluid Mech. 1989. Vol. 200. P. 511–562. doi: 10.1017/S0022112089000753
20. Hellsten A., Zilitinkevich S. Role of convective structures and background turbulence in the dry convective boundary layer // Boundary-Layer Meteorol. 2013. Vol. 149. P. 323–353. doi: 10.1007/s10546-013-9854-6
21. Zilitinkevich S.S., Chalikov D.V. Determination of universal wind and temperature profiles in the atmospheric surface layer // Izvestija AN SSSR — Atmos. Ocean Phys. 1968. Vol. 4, No 3. P. 294–302.
22. Businger J.A., Wyngaard J.C., Izumi Y., Bradley E.F. Flux-Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer // J. Atmos. Sci. 1971. Vol. 28. P. 181–189. doi: 10.1175/1520-0469(1971)028<0181: FPRITA>2.0.CO;2
23. Grachev A.A., Andreas E.L., Fairall C.W., Guest P.S., Persson P.O.G. SHEBA flux–profile relationships in the stable atmospheric boundary layer // Boundary-Layer Meteorol. 2007. Vol. 124. P. 315–333. doi: 10.1007/s10546-007-9177-6
24. Esau I., Grachev A. Turbulent Prandtl Number in Stably Stratified Atmospheric Boundary Layer: Intercomparison between LES and SHEBA Data. e-WindEng, 2007, 005.
25. Sharan M., Kumar P. Estimation of upper bounds for the applicability of non-linear similarity functions for non-dimensional wind and temperature profiles in the surface layer in very stable conditions // Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci. 2011. Vol. 467. P. 473–494. doi: 10.1098/rspa.2010.0220
26. Högström U. Review of some basic characteristics of the atmospheric surface layer // Boundary-Layer Meteorol. 1996. Vol. 78. P. 215–246. doi: 10.1007/BF00120937
27. Johansson C., Smedman A.-S., Högström U., Brasseur J.G., Khanna S. Critical test of the validity of Monin-Obukhov similarity during convective conditions // J. Atmos. Sci. 2001. Vol. 58. P. 1549–1566. doi: 10.1175/1520-0469(2001)058<1549: CTOTVO>2.0.CO;2
28. Ha K.J., Hyun Y.K., Oh H.M., Kim K.E., Mahrt L. Evaluation of boundary layer similarity theory for stable conditions in CASES-99 // Mon. Weather Rev. 2007. Vol. 135. P. 3474–3483. doi: 10.1175/MWR3488.1
29. Zilitinkevich S., Grachev A., Hunt J.C.R. Non-local vertical transport in the shear-free convective surface layer: new theory and improved parameterization of turbulent fluxes // Air Pollution Modelling and Its Application XII (Eds. S.-E. Gryning and N. Chaumerliac), Plenum Publishing Corporation, New York, 1998. P. 321–325.
30. Zilitinkevich S., Calanca P. An extended similarity-theory for the stably stratified atmospheric surface layer // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 2000. Vol. 126. P. 1913–1923.
31. Zilitinkevich S. Towards revision of conventional flux-profile relationships for the stably stratified atmospheric surface layer // Air Pollution Modelling and Its Application XIII (Eds. S.-E. Gryning and E. Batchvarova), Kluwer Academic / Plenum Publishers, NY, 2000. P. 403–407.
32. Smedman A.S. Observations of a multi-level turbulence structure in a very stable atmospheric boundary layer // Boundary-Layer Meteorol. 1988. Vol. 44. P. 231–253. doi: 10.1007/BF00116064
33. Nieuwstadt F.T.M. The Turbulent Structure of the Stable, Nocturnal Boundary Layer // J. Atmos. Sci. 1984. Vol. 41. P. 2202–2216.
34. Glazunov A.V., Mortikov E.V., Barskov K.V., Kadancev E.V., Zilitinkevich S.S. The layered structure of stably stratified turbulent shear flows // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. С. 13–26. doi: 10.31857/S0002-351555413-26
35. 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 // Q. J.R. Meteorol. Soc. 2008. Vol. 134. P. 793–799. doi: 10.1002/qj.264
36. Sun J., Lenschow D.H., Burns S.P., Banta R.M., Newsom R.K., Coulter R., Frasier S., Ince T., Nappo C., Balsley B.B., Jensen M., Mahrt L., Miller D., Skelly B. Atmospheric Disturbances that Generate Intermittent Turbulence in Nocturnal Boundary Layers // Boundary-Layer Meteorol. 2004. Vol. 110. P. 255–279. doi: 10.1023/A:1026097926169
37. Li D., Katul G.G., Zilitinkevich S.S. Revisiting the turbulent Prandtl number in an idealized atmospheric surface layer // J. Atmos. Sci. 2015. Vol. 72. P. 2394–2410.
38. Zilitinkevich S.S., Perov V.L., King J.C. Near-surface turbulent fluxes in stable stratification: Calculation techniques for use in general-circulation models // Q. J.R. Meteorol. Soc. 2002. Vol. 128. P. 1571–1587. doi: 10.1002/qj.200212858309
39. Savijärvi H. Stable boundary layer: Parametrizations for local and larger scales // Q. J.R. Meteorol. Soc. 2009. Vol. 135. P. 914–921. doi: 10.1002/qj.423
40. Mauritsen T., Svensson G., Zilitinkevich S.S., Esau I., Enger L., Grisogono B. A total turbulent energy closure model for neutrally and stably stratified atmospheric boundary layers // J. Atmos. Sci. 2007. Vol. 64. doi: 10.1175/2007JAS2294.1
41. Canuto V.M., Cheng Y., Howard A.M., Esau I. Stably stratified flows: A model with no Ri(cr) // J. Atmos. Sci. 2008. Vol. 65. doi: 10.1175/2007JAS2470.1
42. Zilitinkevich S.S., Esau I. Similarity theory and calculation of turbulent fluxes at the surface for the stably stratified atmospheric boundary layer // Atmospheric Boundary Layers. Springer New York, New York, NY, 2007. P. 37–49. doi: 10.1007/978-0-387-74321-9_4

43. *Esau I.* Simulation of Ekman boundary layers by large eddy model with dynamic mixed subfilter closure // *Environ. Fluid Mech.* 2004. Vol. 4. P. 273–303.
44. *Mahrt L.* Stratified Atmospheric Boundary Layers and Breakdown of Models // *Theor. Comput. Fluid Dyn.* 1998. Vol. 11. P. 263–279. doi: 10.1007/s001620050093
45. *Zilitinkevich S.S., Esau I.* On integral measures of the neutral barotropic planetary boundary layer // *Boundary-Layer Meteorol.* 2002. Vol. 104. P. 371–379. doi: 10.1023/A:1016540808958
46. *Zilitinkevich S.S., Esau I.* Similarity theory and calculation of turbulent fluxes at the surface for the stably stratified atmospheric boundary layer // *Boundary-Layer Meteorol.* 2007. Vol. 125. P. 193–205. doi: 10.1007/s10546-007-9187-4
47. *Zilitinkevich S., Esau I., Baklanov A.* Further comments on the equilibrium height of neutral and stable planetary boundary layers // *Q. J.R. Meteorol. Soc.* 2007. Vol. 133. P. 265–271. doi: 10.1002/qj.27
48. *Zilitinkevich S.S., Tyuryakov A., Troitskaya Y.I., Mareev S.* Theoretical models of the altitude of an atmospheric boundary layer and turbulent involvement at its upper boundary // *Izvestia RAS — Atmos. Ocean Phys.* 2012. Vol. 48. P. 150–160.
49. *Sandu I., Beljaars A., Bechtold P., Mauritsen T., Balsamo G.* Why is it so difficult to represent stably stratified conditions in numerical weather prediction (NWP) models? // *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2013. Vol. 5. P. 117–133. doi: 10.1002/jame.20013
50. *Esau I., Tolstykh M., Fadeev R., Shashkin V., Makhnorylova S., Miles V., Melnikov V.* Systematic errors in northern Eurasian short-term weather forecasts induced by atmospheric boundary layer thickness // *Environ. Res. Lett.* 2018. Vol. 13. 125009. doi: 10.1088/1748-9326/aaecfb
51. *Zilitinkevich S.S., Esau I.* Planetary boundary layer feedbacks in climate system and triggering global warming in the night, in winter and at high latitudes // *Geography, Environment and Sustainability.* 2009. Vol. 1, No 2. P. 20–34.
52. *Esau I., Zilitinkevich S.* On the role of the planetary boundary layer depth in climate system // *Adv. Sci. Res.* 2010. Vol. 4. P. 63–69.
53. *Davy R., Esau I.* Differences in the efficacy of climate forcings explained by variations in atmospheric boundary layer depth // *Nat. Commun.* 2016. Vol. 7. 11690. doi: 10.1038/ncomms11690
54. *Davy R., Esau I., Chernokulsky A., Outten S., Zilitinkevich S.* Diurnal asymmetry to the observed global warming // *Int. J. Climatol.* 2017. Vol. 37. P. 79–93. doi: 10.1002/joc.4688
55. *Petäjä T., Järvi L., Kerminen V.-M., Ding A., Sun J., Nie W., Kujansuu J., Virkkula A., Yang X., Fu C., Zilitinkevich S., Kulmala M.* Enhanced air pollution via aerosol-boundary layer feedback in China // *Scientific Reports.* 2016. Vol. 6. 18998. doi: 10.1038/srep18998
56. *Lappalainen H., Petaja T., Kujansuu J., Kerminen V.-M., Shvidenko A., Bäck J., Vesala T., Vihma T., de Leeuw G., Lauri A., Ruuskanen T., Lapshin V.B., Zaitseva N., Glezer O., Arshinov M., Spracklen D.V., Arnold S.R., Juhola S., Lihavainen H., Viisanen Y., Chubarova N., Chalov S., Filatov N., Skorokhod A., Elansky N., Dyukarev E., Esau I., Hari P., Kotlyakov V., Kasimov N., Bondur V., Matvienko G., Baklanov A., Mareev E., Troitskaya Y., Ding A., Guo H., Zilitinkevich S., Kulmala M.* Pan-Eurasian Experiment (PEEX) — A research initiative meeting the grand challenges of the changing environment of the northern Pan-Eurasian Arctic-boreal areas // *Geography, Environment and Sustainability.* 2014. Vol. 7, No. 2. P. 13–48.