

УДК 551.51;551.55

МОДЕЛИ КЛИМАТА, ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ И ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ СУШИ: ПАМЯТИ В.Н. ЛЫКОСОВА

© 2022 г. В. П. Дымников^а, В. Б. Залесный^а, А. В. Глазунов^{а, б}, В. М. Степаненко^{б, *}

^а Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, ул. Губкина, д. 8, Москва, 119333 Россия

^б Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
ул. Ленинские горы, д. 1, стр. 4, Москва, 119991 Россия

*e-mail: stepanen@srcc.msu.ru

Поступила в редакцию 04.03.2022 г.

После доработки 22.03.2022 г.

Принята к публикации 11.04.2022 г.

Статья посвящается памяти Василия Николаевича Лыкосова — крупного российского ученого, специалиста в области математического моделирования динамики турбулентного пограничного слоя и его взаимодействия с крупномасштабной циркуляцией атмосферы, глобальных и региональных климатических процессов, деятельного слоя суши. Кратко описывается его научная деятельность в контексте современных исследований, характерной особенностью которых является внимание к связям между локальными и глобальными физическими явлениями, сочетание теоретических моделей и численных экспериментов.

Ключевые слова: математическое моделирование, климат, атмосферная турбулентность, деятельный слой суши, В.Н. Лыкосов

DOI: 10.31857/S0002351522040046



Василий Николаевич Лыкосов (14 января 1945 г.—10 сентября 2021 г.).

1. ВВЕДЕНИЕ

Василий Николаевич Лыкосов — крупный российский ученый в области математического моделирования атмосферной турбулентности, циркуляции атмосферы и динамики окружающей среды, родился в г. Карпинске Свердловской области 14 января 1945 г. В 1962 г. он с серебряной медалью окончил школу, и в этом же году участвовал в Первой Всесибирской физико-математической олимпиаде. По результатам олимпиады был приглашен в Новосибирский Академгородок, где поступил на механико-математический факультет Новосибирского государственного университета (НГУ). Окончил НГУ с красным дипломом по специальности “математика” и был распределен в Вычислительный центр Сибирского отделения АН СССР (ВЦ СО АН). В ВЦ СО АН, с 1968 до 1979 г. он прошел путь от младшего научного сотрудника до старшего научного сотрудника. В период с 1979 по 1982 г. являлся заведующим лабораторией сезонных прогнозов Западно-Сибирского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института Гидрометслужбы СССР. В 1982 г. по приглашению академика Г.И. Марчука был переведен в Отдел вычислительной математики при Президиуме АН СССР (с 1991 г. — Институт вычислительной математики РАН).

В 1972 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук “Некоторые вопросы теории турбулентного планетарного слоя атмосферы Земли” (специальность 01.04.12 — геофизика, научный руководитель — проф. Л.Н. Гутман). В 1989 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук “Математическое моделирование взаимодействия планетарного пограничного слоя с подстилающей поверхностью и с крупномасштабной циркуляцией атмосферы” (специальность 01.04.12 — геофизика). 26 мая 2000 г. В.Н. Лыкосов избран членом-корреспондентом РАН по специальности “Физика атмосферы”. Он неоднократно бывал в зарубежных командировках в качестве приглашенного ученого. Наиболее длительные из них — в Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (Рединг, Великобритания, ноябрь 1979 г. — май 1981 г.) и в Институт метеорологии общества Макса Планка (Гамбург, Германия, июль 1992 г. — декабрь 1993 г.).

Указом Президиума Верховного Совета СССР В.Н. Лыкосов награжден медалью “За трудовую доблесть” (1986). Он — лауреат Государственной премии России в области науки и техники (2000) за цикл работ “Модели и методы в задачах физики атмосферы и океана”.

В.Н. Лыкосов преподавал в качестве профессора с 2004 г. на кафедре вычислительных технологий и моделирования факультета вычисли-

тельной математики и кибернетики МГУ имени М.В. Ломоносова, где читал специальные образовательные курсы “Математическое моделирование геофизической турбулентности” и “Вычислительно-информационные технологии в моделировании климата”. Он автор учебных пособий “Суперкомпьютерное моделирование в физике климатической системы” [1] (обложка представлена ниже) и “Модели и методы в проблеме взаимодействия атмосферы и гидросферы” [2] (обложки представлены ниже).

В Институте вычислительной математики (ИВМ) РАН В.Н. Лыкосов работал с 1982 г., сначала в должности старшего научного сотрудника (1982–1990 гг.), затем — ведущего научного сотрудника (1990–2000 гг.), а с 2000 г. — главного научного сотрудника. В последнее время он являлся соруководителем творческого коллектива по теме “Моделирование динамики Земной системы и задачи окружающей среды” и руководителем подтемы “Математическое моделирование региональных природно-климатических процессов”.

Значительная часть его научной деятельности прошла в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, где, работая по совместительству, он руководил лабораторией суперкомпьютерного моделирования природно-климатических процессов Научно-исследовательского вычислительного центра (2002–2019 гг.), а с 2020 г. был главным научным сотрудником. Здесь при ведущей роли Василия Николаевича были созданы научно-образовательные семинары “Математическое моделирование геофизических процессов: прямые и обратные задачи”, “Суперкомпьютерное моделирование Земной системы” (междисциплинарный семинар, организованный совместно МГУ, РАН и Росгидрометом), которыми он руководил с 2003 по 2021 гг. Семинары стали одной из основных площадок России для представления результатов ведущих научных коллективов, работающих на стыке вычислительной математики, геофизической гидродинамики, метеорологии и экологии.

В.Н. Лыкосов прошел замечательный путь в науке. Трудно переоценить его вклад в создание первой в СССР модели совместной общей циркуляции атмосферы и океана. Для реализации этого проекта в ВЦ СО АН СССР была создана группа из молодых научных сотрудников, в которую вошел и Василий Николаевич и руководителем которой стал академик Г.И. Марчук. Результаты работы этой группы были опубликованы в серии статей в советских и зарубежных журналах, и монографии “Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы и океана” [3], вышедшей в 1984 г.

Если говорить о личных качествах Василия Николаевича, которые очень важны в коллективной



В. Н. Лыков, А. В. Глазунов, Д. В. Кулямин,
Е. В. Мортиков, В. М. Степаненко

Суперкомпьютерное моделирование в физике климатической системы



работе, то одно из основных этих качеств можно охарактеризовать одним словом — надежность. Можно было всегда быть уверенным, что если он брался за какое-то дело, то это дело будет сделано, и сделано хорошо. Это касается не только научной работы, но и научно-организационной деятельности, связанной с проведением школ для молодых ученых (серия “CITES”, совместно с Институтом мониторинга климатических и экологических систем (ИМКЭС) СО РАН), семинаров и конференций (серия “ENVIROMIS”, совместно с ИМКЭС СО РАН), работы в редколлегиях и т.п. Многие годы он был членом редакционной коллегии журнала “Известия РАН, Физика атмосферы и океана”.

Ниже кратко изложены результаты по четырем основным темам научных исследований В.Н. Лыковского: моделирование совместной циркуляции атмосферы и океана, атмосферная турбулентность, моделирование процессов переноса тепла и влаги в деятельном слое суши и параметризация водоемов в модели Земной системы.

2. МОДЕЛИ ГЛОБАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА, КЛИМАТА, ЗЕМНОЙ СИСТЕМЫ

В октябре 1973 г. по инициативе академика Г.И. Марчука Отделением океанологии, физики атмосферы и географии Академии Наук СССР было принято решение о создании в СССР математических моделей климата, основанных на уравнениях общей циркуляции атмосферы и океана. Модель климата должна была описывать максимально возможный спектр крупномасштабных движений в глобальной атмосфере и Мировом океане, включая их взаимодействие в планетарном пограничном слое, процессы поглощения и распространения солнечной радиации. Численные алгоритмы совместной модели предполагалось основывать на перспективных методах вычислительной математики, обладающих эффективной реализацией на ЭВМ. Модель требовала знания и оптимального сочетания физики, быстрых алгоритмов и высокопроизводительных компьютеров.

Для решения поставленной супер-задачи — разработки модели совместной циркуляции атмосферы и океана, в Вычислительном центре СО АН СССР была создана специальная группа, пять человек, в которую вошел молодой кандидат наук В.Н. Лыковский, защитивший в 1972 г. диссертацию на тему “Некоторые вопросы теории турбулентного планетарного слоя атмосферы Земли”. У каждого члена группы была общая задача — совместная модель и свой модуль (или подзадача): атмосфера, океан, радиация, планетарный пограничный слой, параметризация мезометеорологических процессов. Основная задача В.Н. Лыковского — специалиста в области атмосферной турбулентности и

мезометеорологии состояла в разработке блоков взаимодействия планетарных слоев атмосферы и Мирового океана и глобальной атмосферной динамики.

Данный подход к решению супер-задачи, основанный на организации специальной “ударной” группы, был успешен — в 1975 году совместная модель была создана [4]. Следующий этап состоял в реализации и верификации модели, с привлечением одной из самых мощных ЭВМ того времени Cray-1 (оперативная память 1 млн слов, быстродействие 80 млн/сек). Эксперименты были проведены В.Н. Лыковым в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды в Реддинге в период с 1979 по 1981 г. Были рассчитаны и проанализированы характеристики средне-январской циркуляции глобальной атмосферы, Мирового океана и совместной системы [3, 5]. Это была первая версия модели, основанная на численном методе расщепления по пространственным процессам и геометрическим координатам. Пространственное разрешение модели было невысоким: 5×5 град. по широте и долготе и 6–8 уровней по вертикали.

К настоящему времени модель совместной циркуляции значительно обогатилась с точки зрения физических процессов, новых параметризаций и модельных блоков. Ее пространственное разрешение значительно повысилось, а длительность интегрирования по времени возросла до сотен лет. Современная модель ИВМ РАН уверенно выходит на уровень модели Земной системы. Результаты модельных расчетов климата Земли, собственной и антропогенной климатической изменчивости, а также перспективы дальнейшего развития климатических моделей на пути создания моделей Земной системы отражены в [6, 7].

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Параметризации процессов турбулентного переноса в геофизических пограничных слоях является неотъемлемой и важной частью крупномасштабных численных моделей атмосферы и океана. В наше время для их построения и уточнения разработчикам доступен обширный набор данных натурных измерений и результатов трехмерного моделирования турбулентности с очень высоким пространственным разрешением (с помощью моделей Direct Numerical Simulation (DNS) and Large Eddy Simulation (LES)). Обилие данных и разнообразие методов их анализа и обобщения порождают иллюзию непрерывного прогресса локально-одномерных моделей пограничных слоев и схем расчета турбулентного обмена между атмосферой и поверхностью. Однако при тщательном тестировании таких моделей зачастую оказывается [8, 9], что разброс между ними, несмотря на

кажущуюся простоту задачи, недопустимо велик, а результаты зависят не только от вида дифференциальных уравнений, но и от наложенных ограничений, вариаций констант и применяемых численных методов.

В.Н. Лыкосов, будучи представителем поколения основоположников теории пограничного слоя, неизменно следовал строгому математического подходу к построению моделей турбулентности. Начиная от кандидатской диссертации “Некоторые вопросы теории турбулентного планетарного слоя атмосферы Земли”, его работы, в первую очередь, основывались на нахождении аналитических решений, выявлении свойств систем нелинейных уравнений, поиске асимптотических зависимостей. Так, решения для кататических склоновых течений, впервые полученные В.Н. Лыкосовым и соавторами [10–12], на тот момент были единственно возможным методом математического описания рассматриваемого явления. С появлением компьютерных расчетов, В.Н. Лыкосов стал не только одним из первых разработчиков одномерных моделей пограничного слоя, но и одним из первопроходцев по внедрению параметризаций турбулентности в численные модели глобальной циркуляции атмосферы [3]. При этом он неизменно тщательно и доказательно изучал математические свойства предлагаемых моделей и параметризаций [13, 14], в чем намного превосходил более поздние исследования. В.Н. Лыкосов внес большой вклад в развитие нелокальных замыканий и моделей противогradientного переноса в атмосферном пограничном слое [15–19]. Несмотря на склонность В.Н. Лыкосова к строгим математическим постановкам задач, среди опубликованных им работ есть и статьи, посвященные натурным измерениям турбулентности, например [20], где наглядно и обоснованно выявлено явление перемежаемости турбулентности при сильной устойчивости. Одним из предметов научной гордости В.Н. Лыкосова была статья [21], где впервые были получены решения, обобщающие теорию подобия Монина-Обухова на случай приземного слоя со взвесью снежных частиц.

В конце прошлого века мощности вычислительных систем достигли того уровня, когда и прямое (DNS), и вихреразрешающее (LES) численное моделирование турбулентности приблизились по информативности и достоверности к измерениям турбулентности в природной среде и в лабораторных условиях. В.Н. Лыкосов был убежденным сторонником приоритетности развития данного направления и инициализировал разработку оригинальных LES- и DNS-моделей в ИВМ РАН и НИВЦ МГУ [22, 23]. При этом, с самого начала он акцентировал внимание на необходимости развития и реализации параллельных суперкомпьютерных вычислительных технологий.

Располагая мощными инструментами генерации данных, каковыми являются трехмерные нестационарные модели турбулентности, нынешние исследователи имеют возможность на новом уровне вернуться к рассмотрению задач, поставленных в свое время В.Н. Лыкосовым и его современниками. Предложенные В.Н. Лыкосовым подходы и решения, хотя и подлежат уточнению и проверке, не теряют своей актуальности и в настоящее время.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА И ВЛАГИ В ДЕЯТЕЛЬНОМ СЛОЕ СУШИ

Впервые внимание Василия Николаевича к задаче математического моделирования тепловлагод переноса в деятельном слое суши было привлечено в 1975 г. во время его участия в летней студенческой экспедиции Ленинградского гидрометеорологического института в Ямало-ненецком автономном округе [24]. Поскольку следовало хорошо понимать и связывать физический процесс, его математическую модель и данные наблюдений, это плодотворно повлияло на его дальнейшую научную деятельность.

Отвечая за параметризацию пограничного слоя в совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана, Василий Николаевич осознавал необходимость адекватного моделирования потоков энергии, массы и импульса на поверхности деятельного слоя суши и океана. К задаче он подошёл как математик, формулируя постановку в наиболее общей форме в противоположность “физическому” подходу, когда малые слагаемые часто отбрасываются в предположении неэкстремальных отклонений физической системы от характерного состояния. Уже в первых работах [25, 26] он рассматривал задачу взаимосвязанного тепловлагод переноса с учётом перекрёстных коэффициентов диффузии и теплопроводности, а также фазовых переходов “вода-лед”. Таким образом, принималась во внимание неизотермичность влагод переноса [27], хотя зависимости перекрёстных коэффициентов от переменных состояния почвы были на тот момент слабо исследованы. Принималось во внимание также наличие незамёрзшей части воды при отрицательной температуре вследствие сильного падения давления в водных менисках высокой кривизны в узких порах. В работах [28, 29] данная модель была дополнена снежным покровом, в котором рассматривается перенос тепла; модель успешно проверена на данных измерений в натуральных условиях и в почвенных монолитах. В модели процесс промерзания/таяния почвы воспроизводится на основе подхода Стефана, то есть с решением эволюционного уравнения для глубины фронта промерзания. Следует отметить, что учёт перекрёстных коэффициентов диффузии и сейчас является редкостью для схем деятельного

слоя суши в моделях погоды и климата, хотя в моделях термогидродинамики почв включение этих эффектов в настоящее время стало принятой практикой [30]. С начала 80-х гг. значительно продвинулись исследования физических механизмов сопряжённого тепловлагопереноса: так, перенос влаги за счёт градиента температуры ассоциируется с зависимостью поверхностного натяжения плёнок влаги от температуры, что дает возможность аналитически получить выражения для перекрёстного коэффициента тепловлагопроводности [31]. Таким образом, постановка задачи тепловлагопереноса в ранних работах В.Н. Лыкосова значительно опередила свое время, и до сих пор является редкой в большинстве блоков деятельного слоя суши. При этом, значительный прогресс физики почв, включая спецификацию коэффициентов взаимного тепломассопереноса, позволяет в настоящее время реализовать задачу на новом уровне.

К началу 1980-х годов в модели климата ВЦ СО РАН/ИВМ РАН деятельный слой суши был представлен интегральной (осреднённой по вертикали) моделью для температуры и влажности почвы [5]. Разработки В.Н. Лыкосова с соавторами конца 70-х гг. легли в основу одномерной (по вертикали) модели почвы, использованной впоследствии в модели климата. Важное развитие схемы деятельного слоя суши было связано с работами ученика Василия Николаевича — Е.М. Володина [32, 33]. Нормированные вертикальные координаты в почве заменены на z -координату с сеткой, сгущающейся к поверхности почвы (23 уровня в почве до глубины 10 м и 4 — в снежном покрове), добавлено уравнение диффузии водяного пара и испарение/конденсация воды в поровом пространстве. Для учета транспирации воды растениями, поверхностного и подповерхностного стока воды заимствованы параметризации из модели ЕСНАМ3 [34]. Введенные усовершенствования позволили заметно улучшить воспроизведение моделью температуры воздуха на высоте 2 м, влажности почвы, атмосферных осадков, распространения многолетней мерзлоты. Следует отметить, что детальное разрешение модели ИВМ РАН в почве по тем временам многими коллегами считалось избыточным, однако последующее развитие моделей почвы также сопровождалось увеличением числа слоев (см. например, модели CLM5, https://escomp.github.io/ctsm-docs/versions/release-clm5.0/html/tech_note/index.html, ORCHIDEE, [35]), что подтвердило верность подхода Василия Николаевича.

Последующим развитием схемы деятельного слоя суши (в климатической модели ИВМ РАН) стало усовершенствование модели снежного покрова, проведенное под руководством В.Н. Лыкосова аспиранткой Е.Е. Мачульской (Володиной) [36, 37]. Добавление в модель уравнения для

жидкой влаги позволило воспроизвести просачивание талой воды сквозь снежный покров с конечной скоростью, что улучшило воспроизведение наблюдаемых сроков схода снежного покрова и наступления пика весеннего половодья. Эта версия схемы снежного покрова послужила также основой [38] для новой версии соответствующей схемы в модели COSMO. В сотрудничестве с Е.Е. Мачульской Василий Николаевич также впервые обратил внимание на важность низкой теплопроводности тонкого растительного покрова (мохов и лишайников) в зоне многолетней мерзлоты для формирования термического режима деятельного слоя [39]. В последнее время при поддержке В.Н. Лыкосова были возобновлены работы по развитию параметризации тепловлагопереноса в мохово-лишайниковом покрове [40].

5. ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМОВ СУШИ ДЛЯ МОДЕЛИ ЗЕМНОЙ СИСТЕМЫ

В начале 2000-х гг. В.Н. Лыкосовым была поставлена задача создания параметризации внутренних водоемов суши для модели Земной системы. В разработанной модели LAKE для описания тепломассопереноса в эволюционирующих слоях льда и воды по аналогии с ранними версиями почвенной модели [25, 26] использованы нормированные вертикальные координаты [41]. В качестве блоков почвы и снежного покрова также привлечены разработанные ранее В.Н. Лыкосовым и его учениками модели. В модель введено уравнение для солёности, что позволяет воспроизводить особенности термодинамического режима озёр, стратифицированных по температуре и солёности [42]. Впервые параметризация водоемов дополнена уравнениями, описывающими генерацию, перенос, потребление и эмиссию метана и углекислого газа в атмосферу [43, 44]. Модель водоема LAKE проверена на данных измерений десятков озёр и включена в модель климата ИВМ РАН [45]. При участии В.Н. Лыкосова создана и внедрена в модель деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ схема термогидродинамики рек на основе уравнений диффузионной волны [46]; она успешно проверена на данных наблюдений по расходу рек Северная Двина, Колыма и др.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обращаясь к пройденному пути Василия Николаевича, отметим его работу с научной молодежью, которой он придавал огромное значение. Он ставил задачи, которые определяли направление научной деятельности учеников на десятилетия. Это происходило, в том числе, и потому, что его постановки часто предполагали востребованность в перспективе, опережали своё время. Он

редко хвалил, был требователен и, в то же время, корректен и деликатен в обращении. Он прививал ученикам привычку регулярности в работе (больше всего не любил, когда люди “пропадали”), приучал к аккуратному ответу на каждый, казалось бы, частный вопрос, который возникал в ходе выполнения основной задачи (“от вопроса нельзя отмахиваться, нужно отвечать”). Приветствовал инициативу, не навязывал своих идей, а чужие предложения, иногда сомнительные, предпочитал не критиковать, а предлагал доказывать. Собственным примером всегда демонстрировал, как любое дело нужно выполнять вовремя и качественно. Крайне редко позволял себе отзывать о ком-либо невежливо. Был очень внимателен к качеству научного русского языка, как в устных обсуждениях, так и в письменных работах, дотошно поправлял тексты своих учеников. Своим многолетним научным и педагогическим трудом Василий Николаевич фактически создал научную школу, хотя не ставил себе этого в заслугу и любил подчёркивать преемственность поколений российской математической традиции, к которой себя по праву относил.

Работа над статьёй выполнена при частичной поддержке Российского научного фонда (грант № 21-71-30003, разделы 1–3) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-05-00773, разделы 4–6). В этих проектах В.Н. Лыкосов принимал самое активное участие до последних дней своей жизни.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыкосов В.Н., Глазунов А.В., Кулямин Д.В., Мортиков Е.В., Степаненко В.М. Суперкомпьютерное моделирование в физике климатической системы. Москва: Издательство Московского университета, 2012. 408 с.
2. Модели и методы в проблеме взаимодействия атмосферы и гидросферы / Под ред. Дымникова В.П., Лыкосова В.Н., Гордова Е.П.: Издательский дом Томского государственного университета, 2014. 523 с.
3. Марчук Г.И., Дымников В.П., Залесный В.Б., Лыкосов В.Н., Галин В.Я. Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы и океана. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1984. 320 с.
4. Марчук Г.И., Дымников В.П., Лыкосов В.Н., Галин В.Я., Бобылева И.М., Залесный В.Б. Гидродинамическая модель общей циркуляции атмосферы и океана (методы реализации). Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1975. 215 с.
5. Marchuk G.I., Dymnikov V.P., and Lykossov V.N.. On relation between index cycles of the atmospheric circulation and spatial spectrum of the kinetic energy in the model of the general circulation of the atmosphere // ECMWF Technical Memorandum. 1981. № 31. P. 1–33.
6. Дымников В.П., Лыкосов В.Н., Володин Е.М. Математическое моделирование динамики Земной системы. // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 3. С. 260–275.
7. Володин Е.М., Мортиков Е.В., Кострыкин С.В., Галин В.Я., Лыкосов В.Н., Грицун А.С., Дианский Н.А., Гусев А.В., Яковлев Н.Г. Воспроизведение современного климата в новой версии модели климатической системы ИВМ РАН // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 2. С. 164–178.
8. Cuxart J. et al. Single-column model intercomparison for a stably stratified atmospheric boundary layer // Boundary-Layer Meteorology. 2006. V. 118. № 2. P. 273–303.
9. Holtslag A.A. M. et al. Stable atmospheric boundary layers and diurnal cycles: Challenges for weather and climate models. // B. Am. Meteorol. Soc. 2013. V. 94. № 11. P. 1691–1706.
10. Шапошникова М.И., Лыкосов В.Н., Гутман Л.Н. Нестационарная нелинейная задача о брize в устойчиво стратифицированной атмосфере // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 1968. Т. 4. № 2. С. 79–89.
11. Лыкосов В.Н., Гутман Л.Н. Турбулентный пограничный слой над наклонной подстилающей поверхностью // Изв. АН СССР. ФАО. 1972. Т. 8. № 8. С. 799.
12. Лыкосов В.Н. Нестационарная задача о планетарном пограничном слое атмосферы Земли // Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана. 1972. Т. 8. № 2. С. 142–155.
13. Казаков А.Л., Лыкосов В.Н. К вопросу о параметризации теплообмена при штормах применительно к задачам взаимодействия атмосферы и океана // Метеорология и гидрология. 1980. № 8. С. 58–64.
14. Лыкосов В.Н. О проблеме замыкания моделей турбулентного пограничного слоя с помощью уравнений для кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 1992. Т. 28. № 7. С. 696–704.
15. Lykossov V.N. K-theory of atmospheric turbulent planetary boundary layer and the Boussinesq's generalized hypothesis // Sov.j. Numer. Anal. Math. Modelling. 1990. V. 5. № 3. P. 221–240.
16. Лыкосов В.Н. О противогradientном переносе момента в струйном течении низкого уровня // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 1991. Т. 27. № 8. С. 803–812.
17. Lykossov V.N. (1992). The momentum turbulent counter-gradient transport in jet-like flows // Advances in Atmospheric Sciences. 1992. V. 9. № 2. P. 191–200.
18. Лыкосов В.Н. Нелокальный турбулентный перенос импульса в течениях со знакопеременным сдвигом скорости // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 1993. Т. 29. № 3. С. 321–327.
19. Zilitinkevich S., Gryanik V.M., Lykossov V.N., & Mironov D.V. Third-order transport and nonlocal turbulence closures for convective boundary layers // Journal of the Atmospheric Sciences. 1999. V. 56. № 19. P. 3463–3477.
20. Lykossov V.N., Wamser C. Turbulence intermittency in the atmospheric surface layer over snow-covered sites //

- Boundary-Layer Meteorology. 1995. V. 72. № 4. P. 393–409.
21. Wamser C., Lykosov V.N. On the friction velocity during blowing snow // Contributions to Atmospheric Physics. 1995. V. 68. № 1. P. 85–94.
 22. Glazunov A., Rannik Ü., Stepanenko V., Lykosov V., Auvinen M., Vesala T., & Mammarella I. Large-eddy simulation and stochastic modeling of Lagrangian particles for footprint determination in the stable boundary layer // Geoscientific Model Development. – 2016. V. 9. № 9. P. 2925–2949.
 23. Mortikov E.V., Glazunov A.V., Lykosov V.N. Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure–strain correlations // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2019. T. 34. № 2. С. 119–132.
 24. Лыкоsov В.Н. Двадцать лет в Академгородке: воспоминания о научной молодости. Наш Марчук / отв. ред.: В.П. Ильин, А.К. Лаврова; сост.: Анд.Г. Марчук, Н.А. Притвиц, Я.И. Фет: Рос. акад. наук, Сиб. отделение, Издательство СО РАН Новосибирск. 2015. С. 277–285.
 25. Лыкоsov В.Н., Палагин Э.Г. Динамика взаимосвязанного переноса тепла и влаги в системе атмосфера–почва // Метеорология и гидрология. 1978. № 8. С. 48–56.
 26. Лыкоsov В.Н., Палагин Э.Г. Тепловлагоперенос в промерзающей почве и агрометеорологический прогноз // Zeitschrift fuer Meteorologie. 1978. V. 28. № 1. P. 34–41.
 27. Глобус А.М. (1983). Физика неізотермічного внутріп’очвенного влagoобмена. Ленинград: Гидрометеoиздат. 279 с.
 28. Лыкоsov В.Н., Палагин Э.Г. Метод и пример расчета переноса тепла и влаги в промерзающей почве при наличии снежного покрова // Труды ГГИ. Т. 264. Гидрометеoиздат Ленинград, 1980. С. 12–23.
 29. Калюжний И.Л., Лыкоsov В.Н., Палагин Э.Г., Румянцев В.А. Моделирование миграции влаги в промерзающих почвенных монолитах // Труды ГГИ. Гидрометеoиздат Ленинград. 1980. Т. 264. С. 24–31.
 30. Saito H., Šimůnek J., & Mohanty B.P. Numerical Analysis of Coupled Water, Vapor, and Heat Transport in the Vadose Zone // Vadose Zone Journal. 2006. V. 5. № 2. P. 784–800.
 31. Noborio K., McInnes, K.J., & Heilman, J.L. Two-Dimensional Model for Water, Heat, and Solute Transport in Furrow-Irrigated Soil: I. Theory // Soil Science Society of America Journal. 1996. V. 60. № 4. P. 1001–1009.
 32. Володин Е.М., Лыкоsov В.Н. Параметризация процессов тепло- и влagoобмена в системе растительность – почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 1. Описание и расчеты с использованием локальных данных наблюдений // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 1998. Т. 34. № 4. С. 453–465.
 33. Володин Е.М., Лыкоsov В.Н. Параметризация процессов тепло- и влagoобмена в системе растительность – почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 2. Численные эксперименты по воспроизведению климата // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 1998. Т. 34. № 5. С. 622–633.
 34. Алексеев В.А., Володин Е.М., Галин В.Я., Дымников В.П., Лыкоsov В.Н. Моделирование современного климата с помощью атмосферной модели ИВМ РАН. Описание модели А5421 версии 1997 года и результатов эксперимента по программе АМІР II: Москва. Депонирование в ВИНТИ. 1998. 215 с.
 35. Bowring S.P.K., Lauerwald R., Guenet B., Zhu D., Guimberteau M., Tootchi A., ... Ciais P. ORCHIDEE MICT-LEAK (r5459), a global model for the production, transport, and transformation of dissolved organic carbon from Arctic permafrost regions – Part 1: Rationale, model description, and simulation protocol // Geoscientific Model Development. 2019. V. 12. № 8. P. 3503–3521.
 36. Володина Е.Е., Бенгтссон Л., Лыкоsov В.Н. Параметризация процессов тепловлагопереноса в снежном покрове для моделирования сезонных вариаций гидрологического цикла суши // Метеорология и гидрология. 2000. № 5. С. 5–14.
 37. Мачульская Е.Е., Лыкоsov В.Н. Моделирование термодинамической реакции вечной мерзлоты на сезонные и межгодовые вариации атмосферных параметров // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38. № 1. С. 20–33.
 38. Machul’skaya E.E., Lykosov V.N. An advanced snow parameterization for models of atmospheric circulation // COSMO Newsletter. 2008. № 8. P. 10–16.
 39. Мачульская Е.Е., Лыкоsov В.Н. Математическое моделирование процессов взаимодействия атмосферы и криолитозоны // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 6. С. 736–753.
 40. Степаненко В.М., Репина И.А., Федосов В.Э., Зилин-тинкевич С.С., Лыкоsov В.Н. Обзор методов параметризации теплообмена в моховом покрове для моделей Земной системы // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 2. С. 127–138.
 41. Степаненко В.М., Лыкоsov В.Н. Численное моделирование процессов тепловлагопереноса в системе водоем – грунт // Метеорология и гидрология. 2005. № 3. С. 95–104.
 42. Stepanenko V., Repina I.A., Artamonov A., Gorin S., Lykosov V.N., Kulyamin D.. Mid-depth temperature maximum in an estuarine lake // Environmental Research Letters. 2018. V. 13. № 3. С. 35006.
 43. Степаненко В.М., Мачульская Е.Е., Глаголев М.В., Лыкоsov В.Н. Моделирование эмиссии метана из озер зоны вечной мерзлоты // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 2. С. 275–288.
 44. Stepanenko Victor, Ivan Mammarella, Anne Ojala, Heli Miettinen, Vasily Lykosov, Timo Vesala. LAKE 2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes // Geoscientific Model Development. 2016. V. 9. № 5. P. 1977–2006.
 45. Bogomolov V., Stepanenko V., and Volodin E. Development of lake parametrization in the INMCM climate model // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016. V. 48. № 1. P. 12005.
 46. Степаненко В.М., Медведев А.И., Корпушенков И.А., Фролова Н.Л., Лыкоsov В.Н. Параметризация речной сети для модели Земной системы // Вычислительные методы и программирование. 2019. Т. 20. № 4. С. 396–410.

Models of Climate, Geophysical Boundary Layers and Land Surface: In Memory of V.N. Lykosov

V. P. Dymnikov¹, V. B. Zalesnyi¹, A. V. Glazunov^{1, 2}, and V. M. Stepanenko^{2, *}

¹*G.I. Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Gubkin str., 8, Moscow, 119333 Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory str., 1, bld. 4, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: stepanen@srcc.msu.ru*

The article is dedicated to the memory of Vasily Nikolaevich Lykosov, a prominent Russian scientist, a specialist in mathematical modeling of the turbulent boundary layer dynamics and its interaction with large-scale atmospheric circulation, global and regional climatic processes and the active land layer. His scientific activity is briefly described in the context of modern research, the latter characterized by attention to the links between local and global physical phenomena, a combination of theoretical models and numerical experiments.

Keywords: mathematical modelling, climate, atmospheric turbulence, land surface, V.N. Lykosov