

8. Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование СССР. М.: Лесная промышленность, 1973. 240 с.
9. Изучение имеющихся и создание новых географических культур. Программа и методика работ. Пушкино: ВНИИЛМ, 1972. 52 с.
10. Matras J. Growth and development of Polish provenances of *Picea abies* in the IUFRO 1972 experiment. Dendrobiology, 2009. Vol. 61, pp. 145–158.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС В ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЯХ: ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ И ДИНАМИКИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

Ретина И.А.^{1,2,3}, Артамонов А.Ю.¹

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, retina@ifaran.ru

²Московский центр фундаментальной и прикладной математики, г.Москва

³Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, г.Москва

Морской ледяной покров определяет изменение альбедо, потоки тепла и влаги, а также динамическое взаимодействие между океаном и атмосферой [1-3]. Полярной зимой лед препятствует теплообмену, но при наличии участков открытой воды (полюней, разводий) из-за большой разницы температур вода-воздух турбулентные потоки тепла возрастают в десятки раз [4,5]. На формирование термического режима приводного слоя атмосферы существенное влияние оказывают и фазовые превращения на поверхности океана, связанные с замерзанием водной поверхности и таянием льдов. Важным свойством морского льда является его сложная поверхностная структура. Это связано и с особенностями ледообразования, и с дрейфом ледяных полей. Каждая поверхностная неоднородность (торосы, разводья, снежницы) играет свою роль как во взаимодействии с приводным слоем атмосферы, так и в термическом и радиационном режиме поверхности. И учет этих морфометрических особенностей важен не только для расчетов, связанных с динамикой и термодинамикой самого льда, но и для климатического моделирования. Наиболее сложны процессы энергообмена на границах, где ледяной покров имеет ярко выраженный сезонный цикл и наблюдается максимальное разнообразие его характеристик [6]. Интерес к исследованию этих районов объясняется тем, что именно здесь наблюдается максимальная пространственная и временная изменчивость состояния дрейфующих льдов, которые, в свою очередь, играют важную роль в крупномасштабных океанических и атмосферных процессах. Прикромочные зоны морских дрейфующих льдов (или в более широком смысле - зоны сезонной миграции) остаются по-прежнему наименее изученными, особенно в зимнее время. Основные проблемы при моделировании морского льда и восстановлении его характеристик по спутниковым измерениям возникают как раз на границах ледяного покрова, для которых отсутствуют данные натурных экспериментов, и нет возможности использовать ту или иную параметризацию для описания процессов, имеющих подсеточный масштаб.

Другим примером сложных поверхностей в полярных районах являются Арктические архипелаги и прибрежные районы Антарктики, которые характеризуются тем, что в летний период от снега открываются поверхности, обладающие различными отражательными и теплофизическими свойствами [7,8]. Это каменистый грунт, грунт, покрытый мхами и лишайниками разных типов, заболоченные участки поверхности. Наряду с этим, весь летний период сохраняются снежники и лед различных морфометрических свойств. С отступлением ледников открываются новые площади

открытого грунта, что в летний период оказывает значительное влияние на суммарный энергетический баланс атмосферы и поверхности.

Исследование режима турбулентного обмена над различными поверхностями необходимо для учета теплофизических свойств различных поверхностей в моделях погоды и климата. Для расчета характеристик взаимодействия атмосферы и океана, в частности потоков тепла, влаги, переноса импульса в моделях, над неоднородными поверхностями, где все пространственные неоднородности оказываются внутри ячейки сетки, применяются различные методы, которые получили название методов агрегирования [9]. Наиболее часто используется два подхода: параметрический и мозаичный. В первом все параметры, характеризующие поверхность и ее взаимодействие с атмосферой (параметр шероховатости, коэффициенты обмена, теплофизические свойства поверхности) осредняются внутри ячейки – и по формулам (1-3) рассчитываются средние для ячейки потоки. В мозаичном методе потоки рассчитываются для каждого типа поверхности, после чего вычисляются средние значения потоков для всей ячейки, причем поток для каждой поверхности суммируется с площадным весом этой поверхности. Оба метода имеют свои достоинства и недостатки, но в любом случае информация о аэродинамических и теплофизических свойствах каждой поверхности, а также ее пространственном распределении необходима для расчетов.

Соппротивление C_D ледовой поверхности в очень большой степени зависит от формы, геометрических размеров и размещения имеющихся на ней неровностей (заструги, торосы). Соппротивление зависит и от состояния снежного покрова, от наличия поземки и снегопадов, от стратификации приземного воздуха. Поэтому коэффициент сопротивления и параметр шероховатости чрезвычайно изменчивы во времени и в пространстве, и в большой степени зависят от метеоусловий и распределения зон торошения и подвижек льда, чем объясняется большой разброс экспериментальных коэффициентов и параметров шероховатости полярных районов. А знание коэффициента аэродинамического сопротивления C_D , и связанного с ним параметра шероховатости z_0 необходимы при расчетах дрейфа ледяных полей, прогнозировании ледовой обстановки, расчетах давления льда на суда и береговые сооружения. В прикромочных зонах лед состоит из ледяных полей размером от километра до нескольких метров. Льдины окружены открытой морской водой, которая порой содержит мокрый снег, шугу и колотый лед. Шероховатость поверхности в этом случае сильно меняется в пространстве в зависимости от размера льдин и расстояния между ними.

Нами установлено, что на перенос импульса в атмосфере влияет не только сопротивление открытой воды и плоских льдин, но также и сопротивление формы, вызванное краями льдин. Учет сопротивления формы и приводит к нелинейной зависимости коэффициента сопротивления от сплоченности морского льда. Прикромочные зоны занимают довольно небольшую площадь в сравнении со всей площадью морского льда, и значимость параметризации сопротивления в них может показаться небольшой. Соппротивление поверхности, покрытой снежниками, что характерно для большей части Арктики в летний период, также зависит от формы поверхности – точнее от возвышения краев снежников над водой внутри. Анализ данных экспериментов показал, что сопротивление увеличивается с увеличением относительной площади снежников и достигает максимума при их 50% концентрации. Для прикромочных зон максимум сопротивления также наблюдается при сплоченности льда 50–60%. То есть концепция параметризации сопротивления, первоначально выведенная для небольших прикромочных зон морского льда, может быть использована для гораздо большего географического региона. В настоящее время для расчета сопротивления наиболее распространен подход когда отдельно считается сопротивление гладкой поверхности, а отдельно – сопротивление формы, вызванное краями морских льдин или

снежиц. Так же в параметризации учитывается устойчивость, которая сильно влияет на поверхностное сопротивление в зимний период.

При измерениях в прикромочных зонах и над снежницами подтвержден факт нелинейной зависимости коэффициента сопротивления от сплоченности льда (А) и относительной площади снежиц (В) (Рис. 1 а,б). Большой разброс при малом количестве снежиц связан с преобладанием других неоднородностей - торосов, заструг и пр. Зависимость коэффициента сопротивления от сплоченности льда может быть параметризована соотношением:

$$10^3 C_D = 1.77 + 4.34A(1 - A^2)$$

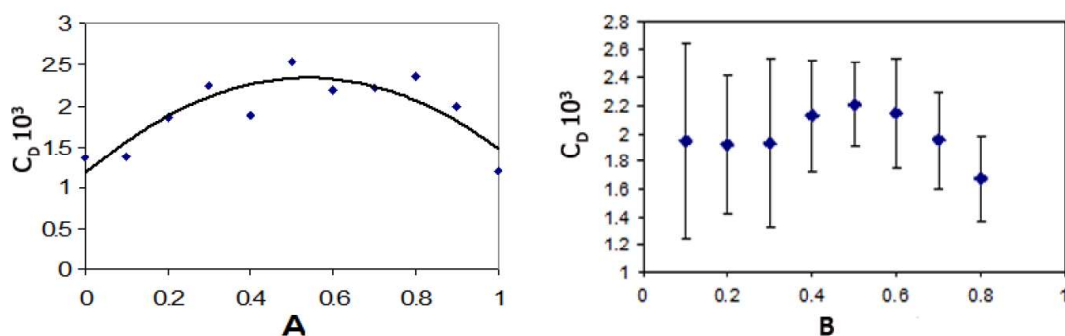


Рис. 1 - Экспериментальная зависимость коэффициента сопротивления от сплоченности морского льда (А) и относительной площади снежиц на его поверхности (В).

С целью определения зависимости характеристик энергообмена от типа поверхности в Антарктике для январских условий был исследован суточный ход потоков над различными поверхностями. Для измерений выбиралась устойчивая малооблачная погода. Установка размещалась так, чтобы не менее 70% области формирования потока попадало на исследуемую поверхность. Было выбрано три поверхности: мох, каменистый грунт, подтаявший снег (Рис. 2). Видно, что при примерно одинаковой тенденции суточного года интенсивность энергообмена в дневные часы существенно зависит от типа поверхности. Наибольшие потоки наблюдаются над каменистым грунтом, который обладает наибольшей теплопоглощательной способностью [7]. Теплофизические свойства мха существенно зависят от его увлажненности и пористости, но в любом случае он также подвержен значительному прогреву [10], но покрытие мхом новых участков грунта приводит к уменьшению потоков тепла. Следовательно, при отступании ледников, увеличении продолжительности бесснежного сезона интенсивность энергообмена в прибрежных районах Антарктики возрастает, что приводит к формированию конвективных туманов, изменению температурных и ветровых условий.

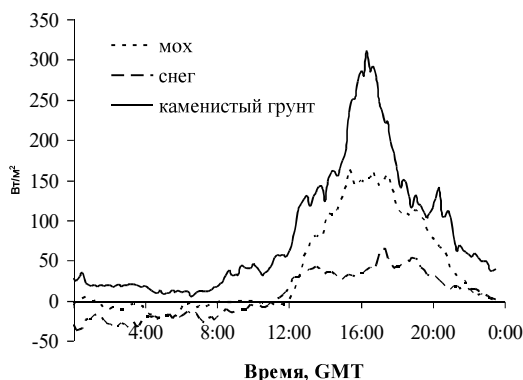


Рис. 2 - Суточный ход потока тепла на станции Беллинсгаузен в зависимости от состояния поверхности.

Полярные области занимают особое место в современной климатической системе как индикатор происходящих изменений вследствие эффекта полярного усиления. Знаковым проявлением этих изменений является резкое увеличение свободной ото льда площади в Северном Ледовитом океане, произошедшее в начале 2000-х годов. Состояние ледяного покрова во многом определяет тепловое взаимодействие между океаном и атмосферой в полярных регионах, а его уменьшение может увеличить интенсивность теплообмена между атмосферой и океаном.

Существенные изменения происходят не только с площадью и толщиной льда, но и его структурой. Изменяется относительная площадь разводий и снежниц, усиливается торошение. Энергообмен в значительной степени зависит от состояния подстилающей поверхности прибрежных зон и архипелагов, а более всего от площади территории, свободной ото льда и снега. Также потоки зависят от ветровых условий (скорости и направления ветра). И от режима осадков. В представленной статье показано, что структурные неоднородности поверхности льда оказывают существенное влияние на его взаимодействие с атмосферой. И особенно таких характеристик льда, как аэродинамическая шероховатость и коэффициент сопротивления. Показана существенная изменчивость этих параметров в зависимости от морфометрических свойств покрытой льдом поверхности. Коэффициент сопротивления нелинейно зависит от сплоченности ледяного покрова, относительной площади снежниц на поверхности, от ширины и конфигурации разводий, от пространственного расположения и высоты торосов, а также от стратификации атмосферы. Полученные по данным измерений параметризации могут быть использованы при расчетах потоков в региональных и климатических моделях.

Исследования проведены при финансовой поддержке гранта РНФ 18-47-06203 (анализ литературных источников) и гранта РФФИ 18-05-60184-Арктика (разработка параметризаций и анализ экспериментальных данных).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Репина И.А., Артамонов А.Ю., Смирнов А.С., Чечин Д.Г. Исследование взаимодействия океана и атмосферы в полярных районах в рамках международного полярного года // Метеорологические и геофизические исследования. Под ред. Г.В. Алексеева. - М. - СПб., 2011. С. 236–250.
2. Ivanov V., Varentsov M., Matveeva T., Repina I., Artamonov A., Khavina E. Arctic Sea Ice Decline in the 2010s. The Increasing Role of the Ocean – Air Heat Exchange in the Late Summer // Atmosphere. 2019. Vol. 10, no. 4. P. 184(1)–184(23).
3. Репина И.А., Артамонов А.Ю., Варенцов М.И., Хавина Е.М. Взаимодействие атмосферы и океана в Северном Ледовитом океане по данным измерений в летне-осенний период // Российская Арктика. 2019. № 7. С. 49–61.
4. Репина И.А., Чечин Д.Г. Влияние полыней и разводий в Арктике на структуру атмосферного пограничного слоя и региональный климат // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 162-170.
5. Репина И.А., Аниферов А.А. Исследование динамики атмосферного пограничного слоя над заприпайной полынью моря Лаптевых по данным WRF-моделирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 275–288.
6. Zippel S., Thomson J. Air-sea interactions in the marginal ice zone // Elementa: Science of the Anthropocene. 2016. V. 4(1). P.000095.
7. Репина И.А., Бобков С.А. Теплофизические свойства льда и разных типов открытой поверхности в районе Антарктического полуострова // Метеорология и Гидрология. 2007. №9. С.74-80.

8. Репина И.А., Артамонов А.Ю. Турбулентный теплообмен атмосферы и подстилающей поверхности в прибрежной зоне Антарктики по данным инструментальных наблюдений // Метеорология и гидрология. 2020. № 2. С. 45–52.
9. Степаненко В.М., Миранда П.М., Лыкосов В.Н. Численное моделирование мезомасштабного взаимодействия атмосферы и гидрологически неоднородной суши. Вычислительные технологии. 2006. Т. 11, ч.3. С. 118-127.
10. Степаненко В.М., Репина И.А., Федосов В.Э., Зилитинкевич С.С., Лыкосов 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.

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ВЕРХОВОГО ТОРФА АРКТИЧЕСКОГО ЭКОРЕГИОНА

Селянина С.Б., Пономарева Т.И., Zubov И.Н., Орлов А.С.

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова УрО РАН, Архангельск, gumin@fciactic.ru

Болотные образования и торфяники играют важную роль в обеспечении биосферного равновесия и устойчивости, являясь неотъемлемым звеном круговорота органического углерода и воды, выполняя функции мощного комплексного сорбента многих химических элементов (в том числе тяжелых металлов), а также выступая регуляторами климатических и гидрологических условий обширных территорий не только в местах распространения болот, но и далеко за их пределами. Поэтому болотам, как регуляторам глобальных процессов, следует уделять особое пристальное внимание. На территории в Арктическом экорегионе РФ доля болотных ландшафтов превышает 30 % [1]. Отличительные особенности экосистем арктического региона состоят в их чувствительности к внешним воздействиям и чрезвычайно низкой скорости самовосстановления [2]. Это делает актуальным использование данных территорий в ненарушенном состоянии с целью сохранения потенциала торфяно-болотных экосистем и получения от них максимально широкого спектра экосистемных услуг [3].

Болота на территории ЕвроАрктического региона РФ начали формироваться в конце последнего оледенения (20-9 тыс. лет назад) [4]. Наступление ледника характеризовалось закрытием горла Белого моря и подпружиниванием рек, впадающих в него. В результате наблюдалось попятное движение рек, вторжение моря до 300 км вглубь материка [5] с образованием приледникового моря. Отступать ледник стал около 13 тыс. лет назад, а полностью территория Архангельской области освободилась ото льда примерно 9 тыс. лет назад [6].

Особенности постледникового рельефа и образование большого количества озер при таянии остатков ледника, а также механический состав гляциальных и флювиогляциальных отложений послужили факторами активного заболачивания, идущего по олиготрофному типу на обширных территориях. Похолодание и увеличение количества осадков в начале атлантического периода ($\approx 4,5$ тыс. лет назад) способствовали еще большей активизации болотообразовательных процессов на этих территориях [6]. В Арктическом экорегионе в пределах Архангельской области олиготрофные торфяники составляют до 80 % всех заболоченных территорий. Здесь выделены две самые крупные болотные провинции Северной Европы – Южноприбалтийская и Печорско-Онежская [4,7,8].

Экологические функции болотных экосистем и их устойчивость к внешним воздействиям во многом определяются структурой и химическим составом торфа.