

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-364-380>
УДК 551.511.62:551.326



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

ОСОБЕННОСТИ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕПЛООБМЕНА ВБЛИЗИ ВСТОРОШЕННЫХ УЧАСТКОВ МОРСКОГО ЛЬДА

Б.В. ИВАНОВ^{1,2,3}, А.В. УРАЗГИЛЬДЕЕВА^{1,2}, А.Н. ПАРАМЗИН¹, С.С. СЫРОВЕТКИН¹,
Д.В. ДРАБЕНКО¹*

¹ — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

² — Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³ — Институт физики атмосферы РАН, Москва, Россия

**b_ivanov@aari.ru*

Резюме

Исследуются особенности процессов турбулентного теплообмена вблизи восторошенных участков морского льда с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Предшествующие исследования показали, что альbedo склонов торосов и турбулентный обмен вблизи гряд отличаются от условий, наблюдаемых на ровном льду. В задачи исследований входили измерения отраженной радиации над восторошенными участками, для последующего расчета альbedo, и проведение измерений скорости ветра и температуры воздуха вблизи подветренных и наветренных склонов для оценки турбулентных потоков явного тепла. Использовался БПЛА, с оригинальным измерительным комплексом, для изучения восторошенных поверхностей и соседних участков ровного льда, а также измерения характеристик приземного слоя атмосферы (температура воздуха/поверхности, скорость ветра) вблизи торосов. Эксперименты показали, что альbedo и температура поверхности торосов ниже, чем на прилегающих участках ровного льда, а турбулентные потоки явного тепла отличаются от аналогичных характеристик, полученных на ровном льду. В условиях увеличивающейся доли тонких однолетних льдов в Арктике, в большей степени подверженных торошению по сравнению с многолетними льдами, оценки теплообмена с атмосферой, возможно, требует определенного пересмотра.

Ключевые слова: альbedo, торосы, ровный лед, турбулентный обмен в приледном слое атмосферы, эксперименты с использованием БПЛА.

Для цитирования: *Иванов Б.В., Уразгильдеева А.В., Парамзин А.Н., Сыроветкин С.С., Драбенко Д.В.* Особенности турбулентного теплообмена вблизи восторошенных участков морского льда // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 3. С. 364 — 380. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-364-380>.

Поступила 19.07.2020

После переработки 12.09.2020

Принята 15.09.2020

TURBULENT HEAT EXCHANGE CHARACTERISTICS IN SEA ICE RIDGES AREAS

BORIS V. IVANOV^{1,2,3*}, ALEXANDRA V. URAZGILDEEVA^{2,1}, ANDREY N. PARAMZIN¹,
SERGEY S. SIROVETKIN¹, DMITRIY V. DRABENKO¹

¹ — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia

² — Saint Petersburg State University, Russia

³ — Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

*b_ivanov@aari.ru

Summary

The studies of the features of turbulent heat exchange were carried out for the first time in domestic practice near ice ridge areas of sea ice using an unmanned aerial vehicle (UAV) as part of the expedition "Transarktika-2019" onboard the R/V "Akademik Tryoshnikov". An original measuring complex designed in AARI, was used to assess the characteristics of the ice surface (ice ridges, flat areas of ice). This made it possible to obtain comparative estimates of the albedo and surface temperature of different morphometric structures of the sections of the ice field, where the expedition's ice camp was organized. Measurements of air temperature and wind velocity were carried in the atmospheric surface layer on flat snow-covered areas of sea ice out from the windward and leeward sides of the ridge in parallel with the UAV flights. As a result of the experiments, it was found that the ice ridges areas have a lower albedo and surface temperature compared to neighboring areas of flat sea ice on average. Turbulent heat fluxes from the windward side of the hummock ridge exceed similar values recorded from the leeward side under conditions of unstable stratification in the atmospheric surface layer and exceed the fluxes calculated for conditions of flat ice on the sections with absence of hummocks, on average. In total, the nature and intensity of turbulent heat conduction in the ice ridges area differs from the analogous values observed on the flat sea ice cover. It is possible that the assessment of heat conduction with the atmosphere requires a certain revision, against the background (within the conditions) of thin first-year ice increasing which is more prone to hummocking than multi-year ice.

Keywords: albedo, flat ice, ice ridges, turbulent heat conduction in the atmospheric surface layer, UAV experiments.

For Citation: Ivanov B.V., Urazgildeeva A.V., Paramzin A.N., Sirovetkin S.S., Drabenko D.V. Turbulent heat exchange characteristics in sea ice ridges areas. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (3): 364 — 380. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-364-380>.

Received 19.07.2020

Revised 12.09.2020

Accepted 15.09.2020

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних десятилетий в Арктике отмечается стабильная тенденция к потеплению, позволяющая предполагать, что это не кратковременные отклонения климатической системы от состояния равновесия, а ее долгопериодные изменения. Пространства открытой воды в Центральной Арктике в августе — сентябре 2007, 2012 и 2016 гг. достигли своих максимальных (рекордных) значений за весь предшествующий период наблюдений. Однако в последующие зимы эти площади были снова покрыты льдом. Например, минимальные летние площади льда в Арктике в 2017 г. были на 1,3 млн кв. км больше соответствующих площадей, наблюдавшихся в 2016 г., что привело к значительному увеличению доли однолетних льдов

[1]. При этом процессы торошения, ввиду уменьшения толщины льда, приобретают повсеместный характер. Подобные явления становятся серьезной проблемой для круглогодичной навигации на трассе Северного морского пути, использование которой неуклонно расширяется, она становится востребованной не только для различных отраслей народного хозяйства, но и для обороноспособности России. Преодоление восторошенных участков по-прежнему остается серьезной проблемой для самых мощных современных атомных ледоколов не только в зимний, но и в весенне-летний сезоны.

Морской ледяной покров является одним из ключевых индикаторов современного состояния полярных климатических систем. Как правило, исследования особенностей процессов энергообмена (турбулентный и радиационный теплообмен) в полярных районах зимой связаны с учетом площадей, занятых молодыми льдами и открытой водой (разводья, полыньи), которые считаются основными источниками теплоотдачи в атмосферу [2]. В весенне-летний период не менее важную роль играют снежницы, являющиеся основными аккумуляторами солнечной энергии в этот период года [3, 4]. Поэтому большинство крупномасштабных и региональных моделей морского льда различного уровня разрешения по пространству и времени учитывают, как правило, только площадь, занятую упомянутыми участками ледяного покрова. В последние десятилетия в условиях наблюдаемой устойчивой тенденции потепления в Арктике («Арктическое усиление») во многих районах Арктического бассейна значительная часть площади поверхности дрейфующих льдов покрыта торосами, что связано с увеличивающейся долей более тонких однолетних льдов (сезонный ледяной покров) и уменьшающимся количеством более толстых старых льдов [5]. Об этом свидетельствуют прежде всего данные спутниковых наблюдений [1]. Значительная масса морского льда перераспределяется из относительно толстых ровных льдов в более тонкие и сильно восторошенные. По некоторым оценкам [6], на торосы может приходиться до 50 % от всего объема льда в Арктическом бассейне, и по прогнозам это количество будет только расти. Исследовать процессы теплообмена через восторошенные льды с помощью стандартных (наземных) методов наблюдений крайне затруднительно. Как следствие, невозможно корректно рассчитать альбедо, оценить температуру и радиационный баланс значительных по площади поверхностей (гряды торосов, восторошенные поля). Немногочисленные экспериментальные и теоретические исследования показывают, что характер и интенсивность процессов теплообмена при наличии торосистых образований заметно отличаются от условий, наблюдающихся на ровном льду [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15], но это никак не учитывается в математических моделях. Технические и методические средства корректной оценки теплообмена над обширными восторошенными поверхностями практически отсутствуют. В первую очередь это касается величины альбедо, важнейшего параметра, определяющего интенсивность таяния морского льда и играющего важную роль в механизме положительных обратных связей. Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) позволяет, в первом приближении, оценить радиационные и термические характеристики таких поверхностей с высокой степенью пространственного разрешения, что чрезвычайно востребовано в математических моделях морского льда. Эксперименты с БПЛА также могут быть использованы для более точной верификации данных, получаемых с помощью искусственных спутников Земли. Пульсационные измерения, выполненные специ-

алистами ИФА РАН вблизи отдельных гряд торосов [13, 14], позволили впервые получить количественные оценки коэффициента аэродинамического сопротивления (коэффициента трения) в приледном слое атмосферы в зависимости от высоты торосов и расстояния до них. Изменение структуры приледного турбулентного слоя, безусловно, должно приводить и к изменению интенсивности турбулентного теплообмена вблизи восторошенных участков ледяного покрова. Наконец, торосы, формирующиеся в осенне-зимний период, в силу характерных особенностей своей внутренней структуры (конгломерат частично смерзшихся ледяных фрагментов и пространств, заполненных морской водой), являются очагами повышенной теплоотдачи в атмосферу по сравнению с ровными заснеженными участками морского льда [12]. Все это указывает на то, что характер и интенсивность теплообмена в районе восторошенных участков могут заметно отличаться от аналогичных процессов, наблюдающихся на ровном льду, и эти обстоятельства необходимо учитывать при оценках теплообмена арктического ледяного покрова с атмосферой в условиях наблюдаемого потепления Арктики. Таким образом, математические модели, использующиеся для оценки ледовых условий различной степени заблаговременности, нуждаются в принципиальном уточнении. В первую очередь это касается определения средних по пространству величин альbedo и толщин снега с учетом площадей, занятых восторошенными льдами, по сравнению с ровными участками морского льда. В современных математических моделях альbedo ровного льда и торосов принимается одинаковым, что противоречит нашим предварительным оценкам. Описание характера теплового взаимодействия между атмосферой и морским льдом основано на корректном учете особенностей этого процесса. В весенне-летний период радиационный баланс в значительной степени определяет суммарный приток тепла от атмосферы к снежно-ледяной подстилающей поверхности. В этот период определяющую роль играют физические процессы, обуславливающие термодинамическое разрушение сплошного ледяного покрова (образование снежиц, их сквозное протаивание и т.п.). И если для ровных участков указанных поверхностей существуют проверенные схемы описания этих процессов, то параметризации процессов теплообмена для участков, занятых торосами, практически отсутствуют.

Как уже указывалось выше, на рубеже XX и XXI вв. в Арктическом бассейне наблюдается устойчивая тенденция к сокращению площади и толщины многолетних льдов [16, 17, 18, 19]. Это подтверждается данными дистанционного зондирования, морских и воздушных экспедиций, результатами, полученными в последние десятилетия на российских дрейфующих станциях. Количественные оценки пространственно-временной изменчивости основных характеристик ледяного покрова (толщина, площадь распространения, сплоченность, торосистость, площадь, занятая снежицами и разводьями) позволяют объективно оценить многолетние тенденции его развития [1, 20]. В ААНИИ накоплен значительный материал (дрейфующие станции «Северный полюс») по морфометрическим свойствам снежного покрова [21]. Однако условия на восторошенных участках, за редким исключением [22], не подвергались серьезному обобщению, критическому анализу и статистической обработке. В последние годы интерес к этим объектам (торосам) значительно возрос, что обусловлено не только требованиями инженерных изысканий на шельфе арктических морей, но и новым взглядом на торосы как с позиций их внутренней структуры, так и термодинамики морского льда [23]. Оригинальные натурные эксперименты, выполненные в Аркти-

ческом бассейне в период экспедиций на НЭС «Академик Федоров» и на российских дрейфующих станциях в период 2007 — 2011 гг., позволили получить первые данные об отражательных характеристиках поверхности отдельных торосов (склонов), особенностях их внутренней радиационной и термической структуры [7, 8, 9, 10, 12]. Это способствовало созданию и апробации в условиях Арктики оригинальных приборных комплексов для проведения специальных метеорологических, актинометрических, теплобалансовых и теплофизических измерений, некоторые из них были использованы нами в экспедиции «Трансарктика-2019». Уникальные возможности БПЛА для исследования таких труднодоступных участков поверхности, как разрушающийся припай, краевая зона ледникового купола (зона трещин), были реализованы нами в рамках 63-й РАЭ в районе антарктической станции Прогресс [24].

В задачи наших экспериментальных исследований, выполненных в рамках экспедиции «Трансарктика-2019», входило получение новых сведений об альбедо и температуре поверхности востороженных участков морского льда и сравнение полученных оценок с аналогичными данными, полученными над ровными участками ледяного поля, а также сравнение величин турбулентных потоков тепла, рассчитанных для условий, формирующихся в приземном слое атмосферы вблизи торосов и на ровном льду.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для получения сравнительных оценок альбедо и турбулентного теплообмена в приледном слое атмосферы вблизи торосов и на ровных участках ледяного поля были выполнены следующие натурные эксперименты и специальные наблюдения в период многосуточной дрейфующей станции, организованной в апреле 2019 г. с борта НЭС «Академик Трёшников» в период экспедиции «Трансарктика-2019»:

- полеты БПЛА со специальным измерительным блоком над востороженными и ровными участками морского льда;
- синхронные (верификационные) измерения отраженной солнечной радиации на ровном участке льда с помощью БПЛА и наземного актинометрического комплекса;
- измерения температуры и скорости ветра в приземном слое атмосферы на ровном льду с наветренной и подветренной сторон гряды торосов;
- специальные снегомерные съемки для оценки толщины снежного покрова на нескольких профилях поперек гряды торосов;
- съемка надводной части торосов (паруса) методами тахеометрической съемки с применением спутникового геодезического оборудования и аэрофотосъемки с применением БПЛА.

Для исследования особенностей пространственного распределения альбедо над ровными и востороженными участками морского льда применялся БПЛА «Explorer Quad2» (гексакоптер) производства компании «Сорокопут». На подвесе БПЛА помещался оригинальный измерительный блок, разработанный в ААНИИ, который состоит из фотометра LI-190SA фирмы «LICOR» (США), ИК-радиометра (Россия), фотокамеры и управляющей платы [24]. Диапазон измерения отраженной радиации 400 — 700 нм, ИК-излучения, с помощью которого оценивалась температура поверхности морского льда, 8 — 14 мк. Внешний вид БПЛА с закрепленным на нем измерительным блоком представлен на рис. 1а. Для проведения измерений приходящей солнечной радиации и верификационных измерений вблизи от иссле-

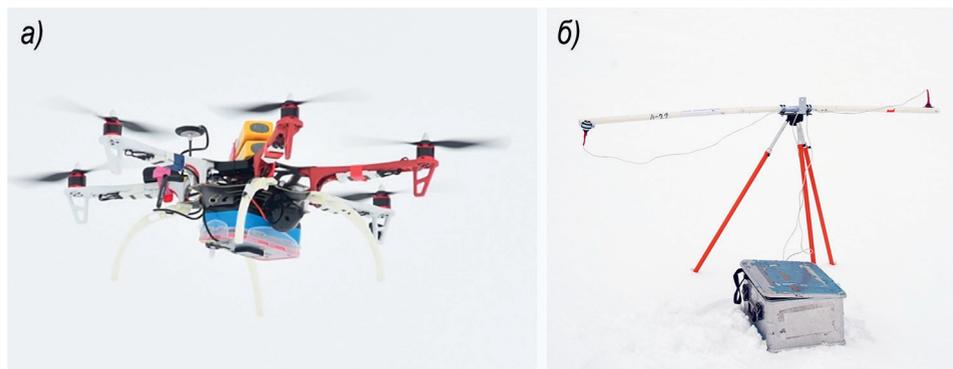


Рис. 1. Гексакоптер “Explorer Quad2” с закрепленным на нем измерительным блоком (а) и установка для проведения наземных актинометрических измерений (б)

Fig. 1. Hexacopter “Explorer Quad2” with a measuring unit (a) and the installation for ground actinometrical measurements (b)

двух торосов на ровном участке льда устанавливалась актинометрическая стойка с пиранометрами, аналогичными по конструкции и спектральному диапазону датчику на БПЛА (см. рис. 1б). Для регистрации проходящей и отраженной солнечной радиации использовались пиранометры LI-192SA и программируемый data-logger LI-1400 фирмы “LICOR”.

Измерения температуры воздуха и скорости ветра в приземном (приледном) слое атмосферы производились при помощи портативных автоматических метеорологических станций (АМС) “GEOS-SkyWatch” (Швейцария), фиксирующих с заданной дискретностью атмосферное давление, температуру воздуха, скорость и направление ветра, а также с использованием высокочувствительных анемометров “Windmaster” (Англия).

Геодезическая съемка надводной части торосов выполнялась двумя методами для контроля полученных измерений. Первый метод — тахеометрическая съемка с применением комплекта двухсистемного (GPS/ГЛОНАСС) спутникового оборудования Sokkia GRX-2 (Япония) (см. рис. 2б). Съемка выполнялась в местной системе координат и с привязкой по высоте к уровню моря. Базовая приемная станция

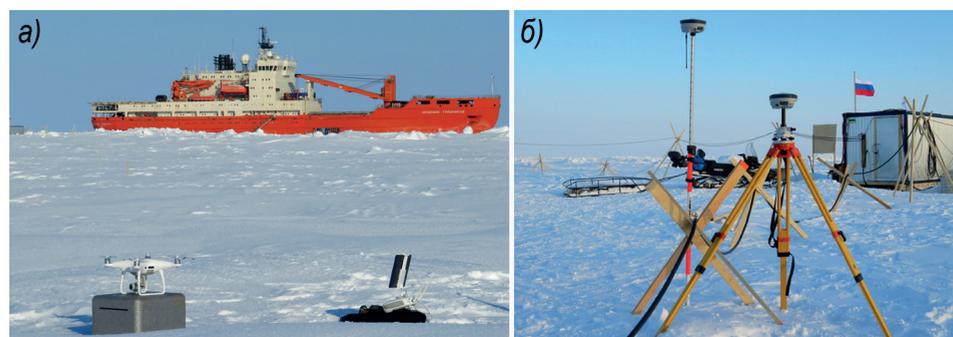


Рис. 2. БПЛА “DJI Phantom-4 Pro” для геодезической съемки надводной части торосов (а) и спутниковое геодезическое оборудование Sokkia GRX-2 (б)

Fig. 2. UAV “DJI Phantom-4 Pro” for geodetic surveying of the ridged ice sail (a) and Satellite geodetic equipment Sokkia GRX-2 (b)

устанавливалась на открытом пространстве, на удалении не более 500 м от места съемки. Непосредственно съемка на торосе выполнялась подвижным спутниковым приемником, смонтированным на вехе. Измерения осуществлялись на параллельных профилях (расстояние между профилями 5 — 10 м), перпендикулярных генеральному распространению гряды торосов.

Съемка торосов методом аэрофотосъемки выполнялась с применением БПЛА (квадрокоптер “DJI Phantom 4 Pro”, Китай) (см. рис. 3а), оснащенного встроенной гиостабилизированной фотоаппаратурой и оборудованием для привязки в географических координатах и по высоте центров получаемых фотоснимков на основе глобальной навигационной спутниковой системы GPS. Съемка выполнялась преимущественно в ясную погоду, для получения контрастных снимков, и при слабом ветре (< 10 м/с), при котором возможна устойчивая работа БПЛА. Полеты выполнялись на высоте 70 — 100 м по схеме, представляющей из себя параллельные галсы, обеспечивающие получение взаимного перекрытия снимков. Данные, полученные при использовании обоих методов, обрабатывались с помощью лицензионного программного обеспечения (Magnet Office Tools, Agisoft Metashape Professional, Surfer) для получения цифровых моделей рельефа в масштабе и с привязкой к уровню воды надводной части исследуемых торосов.

Для проведения экспериментов были найдены три гряды торосов, соседствующие с участками ровного заснеженного льда. Предварительно перед началом полетов были определены основные морфометрические особенности гряды: высота, ширина основания (линейный размер поперек гряды), углы наклона боковых склонов, толщина снега на склонах, ориентация (азимут) относительно максимальной высоты солнца. Полеты БПЛА выполнялись перпендикулярно генеральному распространению гряды на разных высотах (от 10 до 20 м). Последнее обстоятельство диктовалось погодными условиями и безопасностью эксплуатации БПЛА. Характеристики полета квадрокоптера непрерывно фиксировались в его полетном протоколе, что позволяло исключать данные, которые были получены при критических наклонах, резких падениях высоты, попадании в объектив камеры посторонних (крупных) наземных объектов. В процессе полета измерялись отраженная солнечная радиация и температура поверхности. Синхронно выполнялись измерения приходящей и отраженной радиации на ровном участке, в непосредственной близости от тороса. Во время полетов БПЛА выполнялись следующие эксперименты:

- совместные (верификационные) измерения отраженной солнечной радиации над ровными участками ледяного поля (10, 15 и 20 м) с помощью БПЛА и наземного комплекса;

- рабочие полеты перпендикулярно генеральному распространению гряды на разных высотах (10, 15 и 20 м), с регистрацией отраженной солнечной радиации температуры поверхности;

- непосредственно в районе полетов БПЛА проводились профильные (поперек гряды) измерения толщины снежного покрова (количество профилей и пространственная дискретность наблюдений определялись конкретными условиями непосредственно на месте).

Измерения с помощью АМС и анемометров проводились в условиях, когда приземный ветер был направлен под углом 90 ± 20 градусов по отношению к генеральному направлению гряды тороса. Приборы устанавливались на одной высоте

на ровном участке льда. Необходимым условием проведения измерений было отсутствие в радиусе не менее 20 м каких-либо препятствий высотой более 2 м. Были произведены измерения скорости ветра и температуры воздуха (высота 2 м) с наветренной и подветренной сторон гряды торосов в точках на ровном льду, удаленных на равное, не менее 20 м, расстояние от гряды.

Для оценки толщины (высоты) снежного покрова производились снегомерные съемки на нескольких профилях поперек гряды (дискретность измерений 3 — 5 м) с захватом прилегающих участков ровного льда.

В результате проведенных измерений (полеты БПЛА и наземные актинометрические измерения) были сформированы массивы данных приходящей и отраженной солнечной радиации, которые прошли необходимые этапы первичной обработки (критический контроль, поиск ошибочных значений и т.п.). На основе сформированных рядов были рассчитаны величины альбедо (A , %) ровной заснеженной поверхности льда и восторошенных участков. Как правило, разность альбедо ровных и восторошенных участков морского льда превышала 10 % (максимальные различия достигали 30 %). Зафиксированные различия можно считать значимыми, поскольку «относительная ошибка единичного измерения альбедо в реальных условиях не превышает $\pm 5\%$ » [21, с. 33]. Основные характеристики полетов БПЛА над восторошенными участками приведены в таблице 1.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Таблица 1

Основные характеристики полетов БПЛА

Table 1

The main characteristics of AUV flights

Дата	Время съемки	Метеоусловия			Высота полета, м
		T_a , °C	V , м/с	Облачность, балл, форма	
04.04	13:33 — 14:00	-6,2	5,1	10/10, Sc	15, 20
09.04	13:25 — 13:35	-16,8	6,4	10/10, Sc	15
11.04	9:33 — 10:07	-21,7	4,3	0/0	10, 15
11.04	17:08 — 17:33	-23,9	3,6	0/0	10, 15
14.04	10:33 — 10:51	-12,6	3,5	4/10, Sc, As	10, 15
23.04	13:34 — 13:52	-18,3	3,8	10/10, Sc	15, 20
25.04	13:44 — 14:04	-17,6	4,3	0/1, As	15, 20

Как уже было продемонстрировано при экспресс-анализе экспериментальных данных [26], отражательная способность условно ровной заснеженной поверхности морского льда в районе многосуточной ледовой станции выше по сравнению с исследованными восторошенными участками. Для многосуточной дрейфующей станции, исходя из требований безопасности, удобства передвижения личного состава экспедиции, размещения и перемещения приборов и оборудования, была выбрана относительно ровная льдина (поле сморози). Именно поэтому на ее поверхности отсутствовали значительные площади, занятые исключительно восторошенными льдами. Наши исследования были сосредоточены в районе нескольких индивидуальных протяженных гряд торосов, высота которых не превышала 2 м. Таким образом, наши эксперименты проходили не над ожидаемыми сплошными восторошенными полями

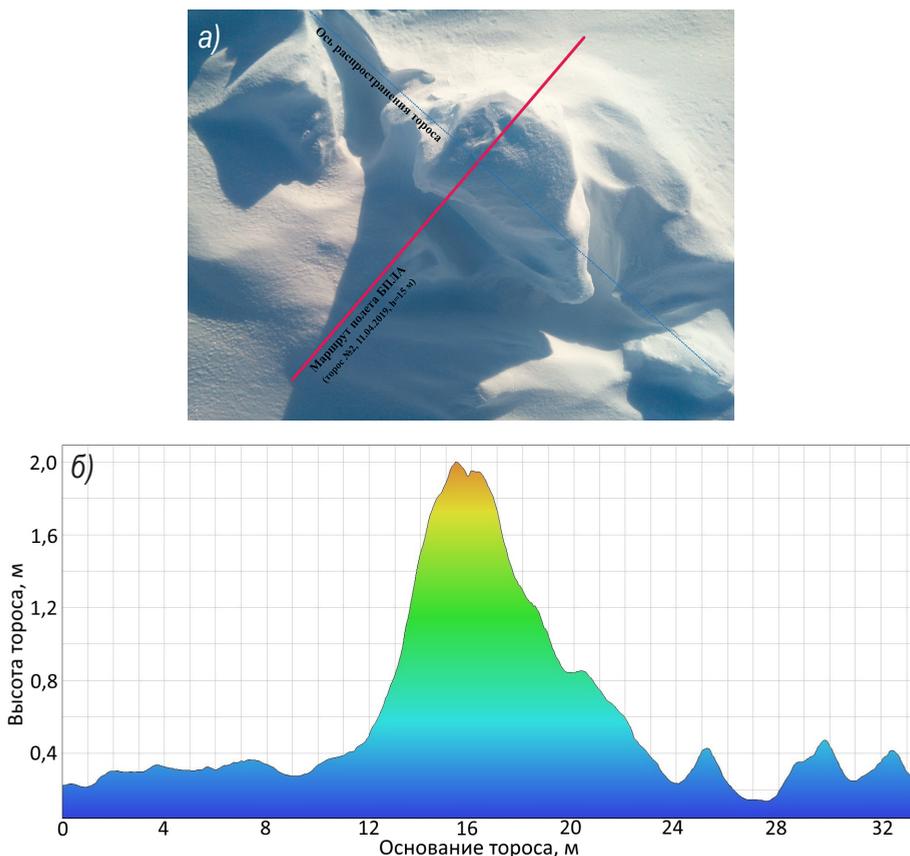


Рис. 3. Снимок тороса № 2, выполненный 11.04.2019 г. с высоты 15 м (а), и его поперечный профиль по маршруту полета БПЛА (б)

Fig. 3. Photo of the ice ridge No 2, taken on 11.04.2019 from a height of 15 m (a), and its cross-section along the UAV flight route (b)

(«однородными» по пространству формами рельефа, которые в вертикальном разрезе могут быть смоделированы кусочно-линейной поверхностью в виде произвольных треугольников), а над индивидуальными грядами, имеющими в вертикальном разрезе форму равностороннего треугольника.

На рис. 3 представлен фотоснимок поверхности такой гряды (торос № 2), полученный с помощью квадрокоптера, а также поперечный профиль, рассчитанный по результатам аэрофотосъемки.

Величины альbedo и температуры поверхности, полученные в результате площадной съемки этой торосистой гряды (участок размерами, приблизительно, 50 × 400 м), представлены на рис. 4. Для наглядности здесь представлены разницы (отклонения) между характеристиками, зафиксированными над восторошенным участком и над соседним участком ровного льда. Необходимо отметить, что наиболее репрезентативные данные, как с точки зрения погодных условий и освещенности, так и с учетом технических характеристик полетов БПЛА, были получены 11.04.2019 над торосом № 2.

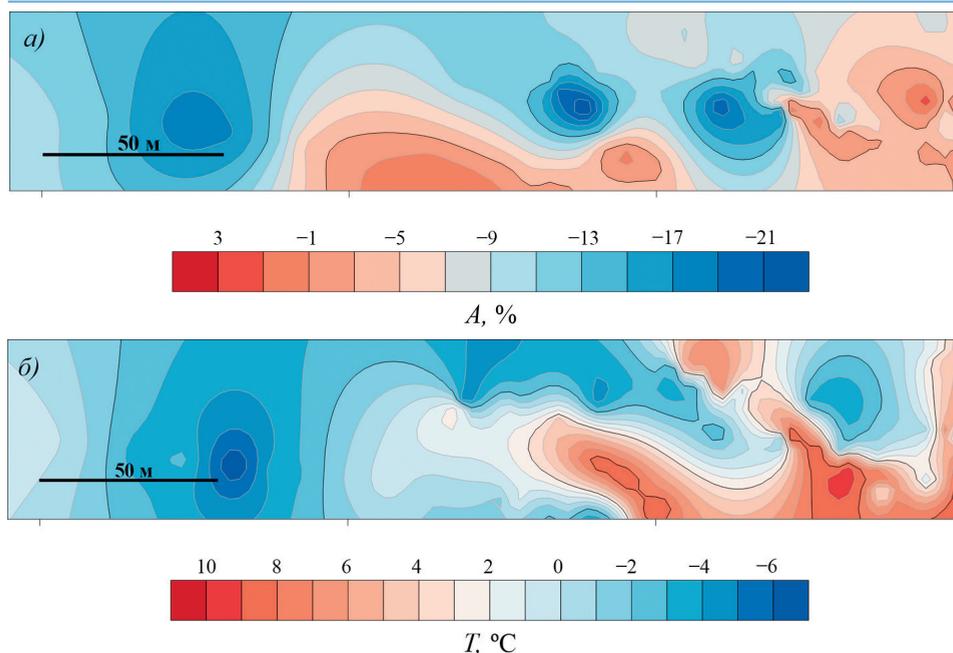


Рис. 4. Отклонения альbedo (*a*) и температуры (*б*) поверхности восторощенного участка от значений, зафиксированных на ровном льду (пунктиром обозначено примерное положение продольной оси гряды)

Fig. 4. Deviations of albedo (*a*) and surface temperature (*б*) of the ice ridge areas from the values recorded on flat ice (the dotted line shows the approximate position of the longitudinal axis of the hummock ridge)

Можно отметить, что значения альbedo и температуры поверхности по продольной оси гряды в целом ниже по сравнению с прилегающими участками относительно ровного заснеженного льда. Полученные оценки (альbedo) в первом приближении соответствуют результатам, представленным в более ранних работах [15, 24]. Обобщив результаты полетов над этим торосистым образованием, а также результаты снегомерных наблюдений, мы попытались получить зависимости альbedo, температуры и толщины снега от высоты тороса (см. рис. 5). Безусловно, эти зависимости соответствуют исключительно локальным внешним условиям (времени года, освещенности, высоте солнца) и геометрии (профилю) конкретной торосистой гряды.

Если мы обратимся к более значимым обобщениям, сделанным, например, в работе [21], то встретим иную зависимость, например, между высотой снежного покрова и высотой торосов, а именно степенную зависимость вида: $y = ax^b$. При этом, как указывается в работе [22], высота снежного покрова зависит не только от высоты гряд торосов, но и от расстояния между грядами. При этом высота снежного покрова на молодых льдах с наветренной стороны гряды в среднем составляет отношение $2/3$ к его высоте с подветренной стороны. В случае наших измерений (одиночная гряда) это соотношение составило $4/5$, а зависимость высоты снежного покрова от высоты тороса мы попытались аппроксимировать зависимостью вида: $y = ax + b$. С учетом ограниченного количества измерений мы не приводим статисти-

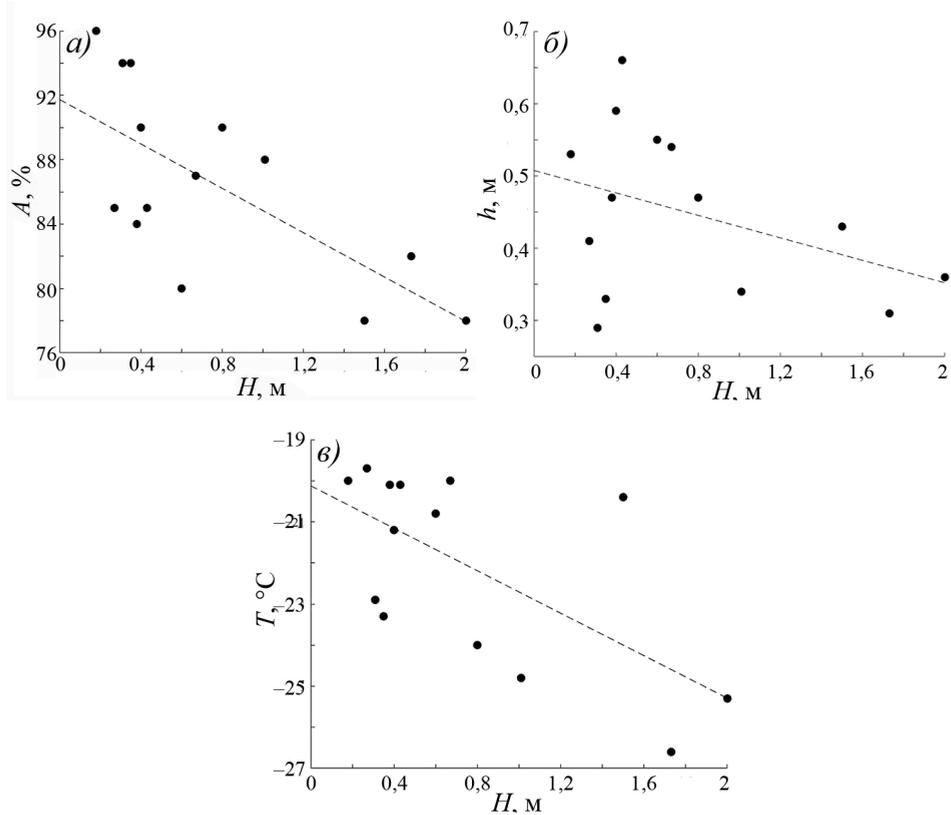


Рис. 5. Зависимость альbedo (а), толщины снега (б) и температуры поверхности снега (в) от высоты тороса

Fig. 5. Albedo (a), snow thickness layer (б) and snow surface temperature (в) and the ice ridge height relationship

ческие оценки полученных зависимостей (коэффициент детерминации, значимость трендов) и рассматриваем их исключительно как предварительные, полученные для локальных условий.

Первые измерения характеристик турбулентности в приледном слое атмосферы вблизи торосов были выполнены, как уже указывалось выше, специалистами ИФА РАН [11, 13]. В дальнейшем прямые (пульсационные) измерения скорости ветра на дрейфующих льдах различной сплоченности и восторошенности были продолжены в рамках российско-американского проекта NABOS в море Лаптевых [14]. В частности, были получены экспериментальные зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления (коэффициента трения) от высоты торосов и расстояния от их гряд с наветренной и подветренной сторон. В наших экспериментах для оценки вертикальных турбулентных потоков тепла мы применили оригинальный алгоритм, основанный на базовых положениях теории подобия Монина–Обухова [26]. Этот алгоритм позволяет использовать осредненные по времени значения скорости ветра и температуры воздуха, измеренные в приземном слое атмосферы, при этом уровни измерений указанных параметров, в общем случае, могут быть различными [27].

В качестве нижнего уровня измерений принимается уровень шероховатости (z_0), в предположении, что температура на этом уровне $T(z_0)$ равна температуре подстилающей поверхности (T_s). Необходимо отметить, что предположение о равенстве T_s и $T(z_0)$ достаточно хорошо выполняется при сравнительно малых z_0 , характерных для поверхности морского ледяного покрова [28]. В дальнейшем алгоритм был усовершенствован, как в направлении уточнения различных условий устойчивости в приледном слое атмосферы, количества уровней измерения температуры и скорости ветра в приземном слое, так и для расчета параметра аэродинамической шероховатости и параметра шероховатости для скаляров (температуры) [29, 30, 31].

В нашем эксперименте АМС и анемометры были установлены, как уже указывалось выше, на расстоянии не менее 20 м с наветренной и подветренной сторон гряды торосов (высота последней не превышала 2 м) на ровных заснеженных участках ледяного поля. Высота измерений составляла 2 м над поверхностью ровного льда. С учетом этих обстоятельств мы можем, в первом приближении, считать такие участки однородными и использовать наш алгоритм для оценки турбулентных потоков тепла. Непрерывная регистрация параметров приледного слоя воздуха с помощью АМС осуществлялась в период полетов БПЛА над выбранными участками. Временные интервалы и характерные метеоусловия (температура, скорость ветра, облачность) были представлены в табл. 1. Дискретность измерений отраженной радиации и температуры поверхности на БПЛА составляла 5 секунд, на АМС 1 минуту. Далее рассчитанные турбулентные потоки осреднялись для промежутков времени, указанных в табл. 1. Как следует из таблицы, эти промежутки составляли от 10 до 35 минут (продолжительность беспосадочных полетов БПЛА). В качестве температуры поверхности ровных участков льда с наветренной и подветренной сторон гряды использовались осредненные величины, полученные в период полетов над такими участками (протяженностью не менее 10 м с обеих сторон гряды, см. рис. 3).

Осредненные за указанные в табл. 1 временные интервалы величины турбулентных потоков явного тепла, относящиеся к наветренному и подветренному участкам гряды, приведены в табл. 2. Здесь же представлены значения турбулентных потоков явного тепла, рассчитанных по данным наблюдений на основной метеорологической площадке дрейфующего лагеря. Необходимо отметить, что информация о температуре поверхности на основной метеоплощадке рассчитывалась по показаниям пиргеометра CGR (Kipp&Zonen), фиксирующего длинноволновое излучение подстилающей поверхности в спектральном диапазоне 4,5 — 42 μm . На БПЛА использовался ИК-радиометр, также позволяющий получать информацию о температуре подстилающей поверхности, но по излучению в отличном от пиргеометра диапазоне длин волн (8 — 14 μm). Безусловно, температура поверхности морского льда, восстановленная по результатам измерений, выполненных различными приборами, может различаться из-за разницы излучательной способности поверхности в различных спектральных диапазонах. Однако использовать однотипные приборы (пиргеометры) не позволила грузоподъемность нашего беспилотника (вес CGR более 2,5 кг). Справедливо полагая, что температура поверхности, рассчитанная (восстановленная) по показаниям стационарного пиргеометра является более корректной (точной) по сравнению с данными, полученными с помощью ИК-датчика БПЛА, мы провели сравнение соответствующих расчетных температур, используя показания БПЛА в период его тестовых полетов вблизи метеоплощадки, т.е. над аналогичной

**Турбулентные потоки явного тепла вблизи гряды торосов
на ровном участке ледяного поля (W/m^2)**

Table 2

**Turbulent fluxes of sensible heat near the ridge of hummocks
and on a flat area of the ice field (W/m^2)**

Дата	Наветренная сторона гряды торосов	Подветренная сторона гряды торосов	Ровная поверхность ледяного поля
04.04	18	10	-8
11.04	-8	-11	-4
25.04	8	1	0

поверхностью. Рассчитав соответствующие поправки в показания ИК-датчика БПЛА, мы выполняли дальнейшие расчеты турбулентных потоков на основании сведений о температуре поверхности ровных участков льда вблизи гряд торосов. Для расчета турбулентных потоков тепла над ровными участками ледяного поля (отсутствие торосов) использовались данные метеорологической станции дрейфующего лагеря экспедиции. Измерения температуры воздуха и скорости ветра там производились на стандартных уровнях: 2 м для температуры воздуха и 10 м для скорости ветра. Таким образом, для обоих участков ровного льда вблизи торосов и на метеоплощадке использовался единый алгоритм расчета: 2 уровня измерения температуры (воздух, поверхность) и 1 уровень измерения скорости ветра.

В первую очередь необходимо отметить, что в условиях неустойчивой стратификации атмосферы (4 и 25 апреля 2019 г.) турбулентные потоки с подветренной стороны уступают (меньше по величине) аналогичным значениям, полученным с наветренной стороны. За грядой (подветренная сторона) формируется внутренний пограничный слой, в котором коэффициент сопротивления, по данным натурных экспериментов [13, 14], уменьшается почти в два раза. Для условий устойчивой стратификации (11.04.2019) картина не столь очевидна. Средние скорости ветра по обе стороны гряды оказались практически равными, порядка 4 м/с, а сами значения потоков различаются на величину, уступающую средней погрешности расчета потоков по данным градиентных наблюдений [2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного анализа экспериментальных исследований показано, что турбулентные потоки явного тепла на ровных участках ледяного поля и вблизи торосов заметно различаются, причем не только по абсолютной величине, но и по направлению. Безусловно, более точные сравнительные результаты можно получить, используя одинаковые методы (градиентный или пульсационный) и средства измерений (собственно датчики), прошедшие предварительное сравнение (сверку) в одинаковых условиях. Но даже полученные нами предварительные результаты указывают на то, что проблема влияния торосистых образований на характер и интенсивность взаимодействия между ледяным покровом и прилегающим слоем атмосферы существует и она требует своей более точной количественной оценки. Как уже указывалось выше, на фоне увеличивающейся доли тонких однолетних льдов по сравнению с более толстыми многолетними льдами процессы торошения происходят с большей интенсивностью и охватывают значительные площади ледяного покрова.

Следовательно, и оценки теплообмена подстилающей поверхности с атмосферой нуждаются в пересмотре или, как минимум, в уточнении.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-05-00471_а «Термодинамика торосов — новый взгляд на теплообмен между атмосферой и ледяным покровом в Арктике. Натурные эксперименты, моделирование» и в рамках раздела 5.1.4 Плана НИТР/ОПР Росгидромета.

Competing interests. The authors have no competing interests.

Funding. This work was carried out with the financial support of the RFBR grant № 18-05-00471_а “Thermodynamics of hummocks — a new look at heat transfer between the atmosphere and ice cover in the Arctic. Natural experiments, modeling” and within Roshydromet Targeted Scientific and Technical Program (TSTP), project 5.1.4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Файловый сервер ААНИИ WDC Sea Ice. URL: <http://wdc.aari.ru/datasets/d0004> (дата обращения 05.07.2020).
2. *Макитас А.П.* Тепловой баланс арктических льдов в зимний период. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 65 с.
3. *Иванов Б.В.* Альbedo морского льда с учетом состояния снежниц и их площади // Труды ААНИИ. 2007. Т. 447. С. 16 — 131.
4. *Иванов Б.В., Андреев О.М.* Особенности термической структуры арктических снежниц // Труды ААНИИ. 2003. Т. 446. С. 176 — 184.
5. *Виноградная Е.С., Егорова Е.С., Шевелева Т.В., Юлин А.В.* Изменчивость положения границ старых льдов в весенний период и остаточных льдов в осенний период в Северном Ледовитом океане в текущем климатическом периоде // Российская Арктика. 2020. № 2 (9). С. 41 — 55. doi: 10.24411/2658-4255-2020-120094.
6. *Tucker W.B. III, Perovich D.K., Gow A.J., Weeks W.F., Drinkwater M.R.* Physical properties of sea ice relevant to remote sensing // Microwave remote sensing of sea ice. AGU Geophysical Monograph Series / Carsey F.D. (editor). Washington DC, USA. 1992. № 68. P. 9 — 28.
7. *Андреев О.М., Иванов Б.В., Безгрешнов А.М.* Особенности перераспределения солнечной радиации в торосах Арктического бассейна // Метеорология и гидрология. 2011. № 1. С. 58 — 63.
8. *Иванов Б.В., Андреев О.М.* К вопросу об определении альbedo торосистого образования // Метеорология и гидрология. 2011. № 6. С. 78 — 83.
9. *Иванов Б.В., Поляков С.П.* Некоторые результаты исследования отражательной способности склонов торосов в центральной части Арктического бассейна // Труды ГГО. 2013. № 569. С. 239 — 248.
10. *Поляков С.П., Иванов Б.В., Андреев О.М., Безгрешнов А.М.* Влияние торосистых образований на радиационные характеристики морского ледяного покрова // Лед и снег. 2011. № 4 (116). С. 80 — 84.
11. *Волков Ю.А., Ретина И.А.* Влияние структуры подстилающей поверхности в полярных районах на энергообмен атмосферы и океана // Поверхностные и внутренние волны в арктических морях / Под ред. И.В. Лавренова и Е.Г. Морозова. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. С. 189 — 206.
12. *Марченко А.В.* Влияние консолидации торосов на тепловые потоки из океана в атмосферу // Труды ААНИИ. 2003. Т. 446. С. 150 — 164.
13. *Ретина И.А., Смирнов А.С.* Перенос тепла и импульса над поверхностями сложной структуры // Математика, компьютер, образование. 2001. Т. 8. Ч. 2. С. 351 — 356.

14. 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.: Паулсен, 2011. С. 236 — 250.
15. Мурзин А.И. К вопросу об определении баланса радиации по профилю восторошенного льда // Труды АНИО. 1964. Т. 230. С. 41 — 44.
16. Алексеев Г.В., Кузмина С.И., Уразгильдеева А.В., Бобылев Л.П. Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на усиление потепления в Арктике в зимний период // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 1. С. 43 — 63.
17. Алексеев Г.В., Кузмина С.И., Глок Н.И. Влияние аномалий температуры океана в низких широтах на атмосферный перенос тепла в Арктику // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. Т. 1. С. 106 — 123.
18. Алексеев Г.В., Кузмина С.И., Глок Н.И., Вязилова А.Е., Иванов Н.Е., Смирнов А.В. Влияние Атлантики на потепление и сокращение морского ледяного покрова в Арктике // Лед и снег. 2017. № 57 (3). С. 381 — 390.
19. Alekseev G., Kuzmina S., Bobylev L., Urazgildeeva A., Gnatiuk N. Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming // International Journal of Climatology. 2019. V. 39. № 8. P. 3582 — 3592.
20. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. Климатические изменения ледовых условий в арктических морях Евразийского шельфа // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 75. С. 149 — 160.
21. Радионов В.Ф., Брызгин Н.Н., Александров Е.И. Снежный покров в арктическом бассейне. СПб.: Гидрометеониздат, 1996. 124 с.
22. Бузуев А.Я., Дубовцев В.Ф. Некоторые закономерности толщины снежно-ледяного покрова в арктических морях // Метеорология и гидрология. 1978. № 3. С. 54 — 60.
23. Андреев О.М., Иванов Б.В. Одномерная термодинамическая модель эволюции тороса // Метеорология и гидрология. 2007. № 6. С. 38 — 43.
24. Журавский Д.М., Прохорова У.В., Иванов Б.В., Куприков Н.М., Курапов М.В. Полевые испытания методики фотограмметрической оценки альbedo снежно-ледниковых поверхностей // Исследования Земли из Космоса. 2019. № 4. С. 18 — 28.
25. Frolov I.E., Ivanov V.V., Filchuk K.V., Makshtas A.P., Kustov V.Yu., Mahotina I.A., Ivanov B.V., Urazgildeeva A.V., Semin V.L., Zimina O.L., Krylov A.A., Bogin V.A., Zakharov V.Yu., Malyshev S.A., Gusev E.A., Baryshev P.E., Pilgaev S.V. Transarctica-2019: winter expedition in the Arctic Ocean on the R/V “Akademik Tryoshnikov” // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 3. С. 255 — 274.
26. Монин А.С., Обухов А.М. Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы // Труды Геофизического института АН СССР. 1954. № 24 (151). С. 163 — 187.
27. Макитас А.П., Иванов Б.В. Алгоритм расчета характеристик турбулентного обмена в приземном слое атмосферы // Физика атмосферы. Т. 12: Примеси в окружающей среде: Сб. науч. тр. Вильнюс: Мокслас, 1988. С. 56 — 63.
28. Быкова Л.П., Преображенский Л.Ю. Аэродинамические характеристики поверхности арктических районов // Труды ГГО. 1977. Т. 399. С. 87 — 114.
29. Макитас А.П., Тимачев В.Ф., Соколов В.Т., Кустов В.Ю., Говорина И.А. Процессы турбулентного энергообмена на границе морской лед — атмосфера по историческим данным и данным дрейфующих станций «Северный полюс-35» и «Северный полюс-39» // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 1 (99). С. 53 — 64.

30. Макштас А.П., Иванов Б.В., Тимачев В.Ф. Сравнение параметризаций турбулентного энергомассообмена в устойчиво-стратифицированном приземном слое атмосферы // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 3 (93). С. 5 — 18.

31. Иванов Б.В., Тимачев В.Ф. Тепловой баланс снежной поверхности морского льда в море Лаптевых весной 2009 года // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 4 (94). С. 99 — 104.

REFERENCES

1. AARI WDC Sea Ice file server. Available at: <http://wdc.aari.ru/datasets/d0004> (accessed 05.05.2020).
2. Makshatas A.P. *Teplovoi balans arkticheskikh l'dov v zimnii period*. Heat balance of arctic ice during winter period. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984: 65 p. [In Russian].
3. Ivanov B.V. Albedo of sea ice taking into account the state of melt ponds and their area. *Trudy AANII*. AARI Proceeding. 2007, 447: 16 — 131. [In Russian].
4. Ivanov B.V., Andreev O.V. Features of arctic melt ponds thermal structure. *Trudy AANII*. AARI Proceedings. 2003, 446: 176 — 184. [In Russian].
5. Vinogradnaya E.S., Egorova E., Sheveleva T.V., Ylin A.V. Variability of the position of the boundaries of old ice in the spring and residual ice in the autumn in the Arctic Ocean in the current climatic period. *Rossiyskaya Arktika*. The Russian Arctic. 2020, 2 (9): 41 — 55. [In Russian].
6. Tucker W.B. III, Perovich D.K., Gow A.J., Weeks W.F., Drinkwater M.R. Physical properties of sea ice relevant to remote sensing. In: *Microwave remote sensing of sea ice*. AGU Geophysical Monograph Series. Carsey F.D. (editor). Washington DC, USA. 1992, 68: 9 — 28.
7. Andreev O.M., Ivanov B.V., Bezgreshnov A.M. Features of the redistribution of solar radiation in the hummocks of the Arctic basin. *Meteorologiya i Gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2011, 1: 58 — 63. [In Russian].
8. Ivanov B.V., Andreev O.M. To the question of determining the albedo of hummocky formation. *Meteorologiya i Gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2011, 6: 78 — 83. [In Russian].
9. Ivanov B.V., Polykov S.P. Some results of a study of the reflectivity of hummock slopes in the central part of the Arctic basin. *Trudy GGO*. MGO Proceeding. 2013, 569: 239 — 248. [In Russian].
10. Polykov S.P., Ivanov B.V., Andreev O.M., Bezgreshnov A.M. Influence of hummocky formations on the radiation characteristics of the sea ice cover. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2011, 4 (116): 80 — 84. [In Russian].
11. Volkov Y.A., Repina I.A. Influence of the structure of the underlying surface in the polar regions on the energy exchange between the atmosphere and the ocean. Surface and internal waves. Ed. By I.P. Lavrenov, E.G. Morozov. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2002: 189 — 206. [In Russian].
12. Marchenko A.V. Effect of ice hummock consolidation on heat fluxes from the ocean to the atmosphere. *Trudy AANII*. AARI Proceedings. 2003, 446: 150 — 164. [In Russian].
13. Repina I.A., Smirnov A.S. Heat and momentum transfer over complex surfaces. *Matematika, komputer, obrazovanie*. Mathematic, computer, education. 2001, 8 (4): 351 — 356. [In Russian].
14. Repina I.A., Artomonov A.Y., Smirnov A.S., Chechin D.G. Study of the interaction of the ocean and the atmosphere in polar regions within International Polar Year. Meteorological and Geophysic researches. Ed. by G.V. Alekseev. Moscow; St. Petersburg: Paulsen ltd., 2011: 236 — 250. [In Russian].
15. Murzin A.I. On the question of determining the balance of radiation from the profile of hummock ice. *Trudy ANIO*. ARO Proceedings. 1964, 230: 41 — 44. [In Russian].
16. Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Urazgildeeva A.V., Bobulev L.P. The influence of atmospheric heat and moisture transport on the intensification of warming in the Arctic in winter. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*. Fundamental and Applied Climatology. 2016, 1: 43 — 63. [In Russian].
17. Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Glok N.I. Influence of ocean temperature anomalies in low latitudes on atmospheric heat transfer to the Arctic. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*. Fundamental and Applied Climatology. 2017, 1: 106 — 123. [In Russian].

18. *Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Glok N.I., Vyazilova A.E., Ivanov N.E., Smirnov A.V.* Impact of the Atlantic on warming and decreasing sea ice cover in the Arctic. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2017, 57 (3): 381 — 390. [In Russian].
19. *Alekseev G., Kuzmina S., Bobylev L., Urazgildeeva A., Gnatiuk N.* Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming. *International Journal of Climatology*. 2019, 39 (8): 3582 — 3592.
20. *Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalev E.G., Smolyanitsky V.M.* Climatic changes in ice conditions in the Arctic seas of the Eurasian shelf. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Problems of the Arctic and Antarctic*. 2007, 76: 149 — 160. [In Russian].
21. *Radionov V.F., Bryazgin N.N., Aleksandrov E.I.* *Snezhnyi pokrov v arkticheskom basseine*. Snow cover in the arctic basin. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1996: 124 p. [In Russian].
22. *Buzuev A.I., Dubovtsev V.F.* Some regularities of the thickness of the snow-ice cover in the arctic seas. *Meteorologiya i Gidrologiya. Meteorology and Hydrology*. 1978, 3: 54 — 60. [In Russian].
23. *Andreev O.M., Ivanov B.V.* One dimensional model of hummock evolution. *Meteorologiya i Gidrologiya. Meteorology and Hydrology*. 2007, 6: 38 — 43. [In Russian].
24. *Zhuravsky D.M., Prokhorova U.V., Ivanov B.V., Kuprikov N.M., Kurapov M.V.* Field tests of the method for photogrammetric estimation of the albedo of snow-glacial surfaces. *Issledovaniya Zemli iz Kosmosa. Exploration of the Earth from Space*. 2019, 4: 18 — 28. [In Russian].
25. *Frolov I.E., Ivanov V.V., Filchuk K.V., Makshtas A.P., Kustov V.Yu., Mahotina I.A., Ivanov B.V., Urazgildeeva A.V., Semin V.L., Zimina O.L., Krylov A.A., Bogin V.A., Zakharov V.Yu., Malyshev S.A., Gusev E.A., Baryshev P.E., Pilgaev S.V.* Transarctica-2019: winter expedition in the Arctic Ocean on the R/V “Akademik Tryoshnikov”. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Problems of the Arctic and Antarctic*. 2019, 3 (65): 235 — 274.
26. *Monin A.S., Obukhov A.M.* Basic regularities of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Trudy Geofizicheskogo instituta AN SSSR. Proceedings of Geophysical institute AS USSR*. 1954, 24 (151): 163 — 187. [In Russian].
27. *Makshtas A.P., Ivanov B.V.* Algorithm for calculating the characteristics of turbulent exchange in the near water layer of the atmosphere. *Fizika Atmosfery. 12. Primesi v okryzhaushei srede. Atmospheric Physics. 12. Impurities in the environment*. Vilnius: Mokslas, 1988: 56 — 63. [In Russian].
28. *Bukova L.P., Preobrajenskiy L.Y.* Aerodynamic characteristics of Arctic area surface. *Trudy GGO. MGO Proceeding*. 1977, 399: 87 — 114. [In Russian].
29. *Makshtas A.P., Timachev V.F., Sokolov V.T., Kustov V.Y., Govorina I.A.* Processes of turbulent energy exchange at the sea ice — atmosphere boundary according to historical data and data from drifting stations “North Pole-35” and “North Pole-39”. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research*. 2014, 1 (99): 53 — 64. [In Russian].
30. *Makshtas A.P., Ivanov B.V., Timachev V.F.* Comparison of the parameterizations of turbulent energy and mass exchange in a stably stratified surface layer of the atmosphere. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Problems of the Arctic and Antarctic*. 2012, 3 (93): 5 — 18. [In Russian].
31. *Ivanov B.V., Timachev V.F.* Heat balance of the snow surface of sea ice in the Laptev Sea in spring 2009. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Problems of the Arctic and Antarctic*. 2012. № 4 (94): 99 — 104. [In Russian].