# Изменение ледовых условий в Арктике согласно спутниковым наблюдениям

Е.В. Шалина<sup>1,2</sup>, Л.П. Бобылев<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет. Институт наук о Земле, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена, Берген, Норвегия E-mail: elena.shalina@niersc.spb.ru; leonid.bobylev@niersc.spb.ru

В статье приведены данные о трансформациях ледяного покрова Арктики за период спутниковых наблюдений. Разные характеристики ледяного покрова описываются по разным данным, соответственно, периоды, для которых зафиксированы изменения, различаются. Самый длинный временной промежуток определяется доступностью пассивных микроволновых измерений, которые позволяют оценить изменение протяжённости ледяного покрова, длительности сезона таяния, а также соотношения площадей однолетних и многолетних льдов. В статье показано, что сокращение ледяного покрова происходит со средней скоростью 4,5% за десятилетие, при этом протяжённости льдов зимой уменьшается со скоростью 2,9% за десятилетие, а тренд сокращения протяжённости льдов, переживших летнее таяние, составляет -11,3% за декаду. В среднем наблюдается сокращение протяжённости ледового сезона, более раннее наступление таяния весной и более позднее замерзание осенью. Данные космического мониторинга показывают, что за время спутниковых наблюдений произошло изменение соотношения старых и молодых льдов: в настоящее время однолетние льдов старше пяти лет уменьшилась с 16% в середине 1980-х гг. до 1,2% в 2016 г. Лёд Арктики стал в среднем более тонким, что привело к существенному увеличению скорости дрейфа льдов после 2000 г.

**Ключевые слова:** ледяной покров Арктики, спутниковые наблюдения, пассивное микроволновое зондирование, площадь ледяного покрова, толщина льда, возраст льда, таяние и замерзание в Арктике, глобальное потепление

Accepted: 30.11.2017 DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-28-41

#### Введение

Спутниковые наблюдения являются основой мониторинга ледяного покрова в Арктике, обеспечивая как оперативное получение объективных сведений о состоянии морского льда и наличии опасных ледяных образований, так и накопление информации о трансформациях ледовых условий, позволяющее оценивать произошедшие изменения и строить прогнозы относительно изменений будущих. Возможности и ограничения методов дистанционного зондирования при мониторинге ледяного покрова зависят от используемого диапазона электромагнитного спектра, типа зондирования (активное или пассивное), а также от параметров съёмки и свойств аппаратуры.

Первым специализированным спутником, запущенным с целью изучения различных параметров океана, считается американский спутник SeaSat, выведенный на орбиту в июне 1978 г. Главной задачей этой миссии было испытание приборов пассивного и активного спутникового дистанционного зондирования океанической поверхности в микроволновом диапазоне. Программа полёта включала изучение морфологии морского льда и его динамики. Среди приборов, работа которых была протестирована на этом спутнике, были радиолокатор с синтезированной апертурой и многоканальный микроволновый радиометр SMMR (Taylor et al., 1981), который затем был установлен на борту спутника Nimbus-7. Первая российская

специализированная океанографическая программа включала в себя запуск двух спутников — «Космос-1076» (запущен в феврале 1979 г.) и «Космос-1151» (запущен в январе 1980 г.). На борту был установлен микроволновый радиометр, измерения которого планировалось использовать для определения параметров льдов, кроме того, инструментальная нагрузка спутника включала три других прибора. Это была тестовая программа, главной целью которой было уточнить задачи и программу следующей спутниковой океанографической миссии, состоявшей из спутников серии «Океан». Начиная с первого спутника «Космос-1500», запущенного в рамках программы «Океан» (выведен на орбиту в сентябре 1983 г.), все спутники оснащались радиолокационной системой бокового обзора в комплекте с пассивной радиометрической аппаратурой. Совместная обработка радиолокационных и радиометрических данных позволила снять неоднозначность в разделении границ между однолетним льдом и взволнованной морской поверхностью, а также исследовать изменчивость протяжённости и границ распространения многолетнего и однолетнего льда за период с 1983 по 2000 г. (Асмус и др., 2002). Развитие технологий, а также научных представлений о способах получения информации о ледяном покрове из космоса способствовали появлению всё более совершенных приборов и методов наблюдения за арктическими льдами из космоса. В итоге к настоящему времени мы имеем огромный массив данных, описывающих как текущее состояние ледяного покрова Арктики, так и его изменения. Базируясь на спутниковых наблюдениях, определяют протяжённость ледяного покрова, толщину льдов, их возраст, дрейф, а также типы льдов. Некоторые из накопленных рядов имеют достаточную протяжённость, чтобы делать заключения о климатических изменениях, в частности, это относится к данным о протяжённости (площади) ледяного покрова и к сведениям об изменениях в соотношении типов льдов.

Вследствие присущего климатической системе Земли явления «арктического усиления» (Bekryaev et al., 2010; Johannessen et al., 2016; Lu, Cai, 2010; Pithan, Mauritsen, 2014; Serreze, Barry, 2011), наблюдаемое в настоящее время глобальное потепление наиболее сильно выражено в Арктике. Сокращение площади льдов Арктики является наиболее явным проявлением современного потепления, являясь в то же время одной из главных движущих сил арктического усиления (Screen, Simmonds, 2010; Screen, Francis, 2016) за счёт положительной обратной связи между уменьшением альбедо морской поверхности при сокращении площади, покрытой льдом, и увеличением поглощения солнечной радиации. Другой процесс, вносящий вклад в арктическое усиление и связанный с параметрами ледяного покрова, — это ослабление теплоизоляционной способности льда в осенне-зимний период. Лёд в среднем становится тоньше, а потому слабее изолирует более тёплые воды океана от холодной атмосферы, способствуя повышению температуры воздуха и далее увеличению концентрации водяного пара и облачности, что, в свою очередь, ведёт к увеличению приходящего на поверхность длинноволнового излучения и способствует замедлению нарастания толщины льда. Наличие и надёжность данных о происходящих изменениях в ледяном покрове Арктики имеют принципиальное значение для совершенствования модельных расчётов и, в частности, для повышения точности прогнозов относительно изменений климата Арктики и глобального климата в будущем.

Кроме научной значимости, сведения о состоянии ледяного покрова, а также тенденции изменения его параметров имеют очевидное значение для мореходства в Северных морях, для планирования и осуществления добычи полезных ископаемых на шельфе, а также при разработке программ развития северных территорий Российской Федерации. В частности, изменение ледовых условий в Арктике напрямую связано с уровнем использования Северного морского пути, имеющего большое значение для обеспечения дальнейшего развития как экономики арктических регионов, так и государства в целом.

### Трансформации протяжённости ледяного покрова

Как отмечено выше, полноценный мониторинг ледяного покрова обширных и труднодоступных областей Арктики может быть осуществлён только на основе спутниковых наблюдений. Наиболее продолжительный однородный ряд данных о состоянии арктического ледяного

#### Е.В. Шалина, Л.П. Бобылев

покрова существует и пополняется благодаря программе, финансируемой Министерством обороны США, наблюдения в рамках которой начались в октябре 1978 г. на спутнике Nimbus-7 с помощью микроволнового радиометра SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer) и продолжились на серии спутников DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) с использованием прибора SSM/I (Special Sensor Microwave / Imager), а затем прибора SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder). Радиометр SSMIS поставляет данные в настоящее время. Измерения микроволнового диапазона обладают важным преимуществом (по сравнению с видимым и ИК-диапазонами спектра), которое состоит в том, что данные о морской поверхности получают при любой освещённости, в том числе в течение полянрой ночи, а также при наличии облачности. Важным преимуществом упомянутого ряда спутниковых наблюдений является его общедоступность, в результате эти данные служат основным источником информации об изменениях протяжённости и сплочённости ледяного покрова Арктики за последние 39 лет. Данные позволяют разделять покрытую льдом поверхность океана и открытую воду и описывать трансформации многолетних и однолетних льдов с разрешением 25 км.

Сокращение ледяного покрова Арктики, в том числе сокращение площади многолетних льдов, привлекло внимание учёных уже в конце прошлого столетия (Johannessen et al., 1999; Vinnikov et al., 1999). В текущем столетии исследования констатировали всё убыстряющееся сокращение площади льдов северного полушария (Шалина, 2015; Cavalieri, Parkinson, 2012; Meier et al., 2007; Parkinson et al., 1999; Stroeve et al., 2012; Serreze, Stroeve, 2015): от 3 % за декаду в начале столетия до 4,6 % к концу 2015 г. Сокращение протяжённости ледяного покрова Арктики за период пассивных спутниковых наблюдений в микроволновом диапазоне по данным до октября 2017 г. показано на *рис. 1.* Под протяжённостью (*англ.* extent) здесь понимается площадь, занятая льдами со сплочённостью более 15% (0,15 баллов). Сплочённость рассчитывалась с использованием алгоритма NORSEX (Svendsen et al., 1983). На рисунке приведены среднемесячные значения. Среднее сокращение протяжённости ледяного покрова за период спутниковых пассивных микроволновых наблюдений составляет в абсолютных величинах 56 900 км<sup>2</sup> в год или 4,5% за декаду (по отношению к среднему за весь период наблюдений).

Рисунок 1 даёт представление, как менялись абсолютные значения протяжённости ледяного покрова. Анализ отклонений от средних показывает изменчивость этого параметра (*puc. 2*) и позволяет выявить три временных промежутка, характеризующихся разными тенденциями изменения площади. С начала измерений до конца 1997 г. сокращение протяжённости морских льдов составляло в среднем 26 000 $\pm$ 3600 км<sup>2</sup> в год или 2,1% за декаду (по отношению к среднему за этот период), с 1998 по 2006 г. (включительно) тенденция изменилась и составила –114 800 $\pm$ 8800 км<sup>2</sup> в год, т.е. увеличилась примерно в четыре раза, до –10% за декаду. В последние годы — с 2007 по 2017 г. — наблюдается очень большая изменчивость протяжённости арктических льдов; сокращение в среднем составляет 40 200 км<sup>2</sup> в год, при этом среднеквадратическое отклонение от этой тенденции равно 15 600 км<sup>2</sup>.

Основной вклад в тенденцию сокращения площади льдов в Арктике вносит процесс сокращения ледовитости в летние месяцы (Шалина, 2013, 2015; Parkinson, Comiso, 2013; Stroeve et al., 2012). На *рис. 1* показаны изменения протяжённости льдов в марте (фиолетовые ромбы и соответствующая линия тренда), когда в Арктике наблюдается максимум ледовитости, и в сентябре (оранжевые ромбы и линия тренда), когда наблюдается минимум распространения льдов после летнего таяния. Видно, что, во-первых, изменения протяжённости льдов в оба месяца характеризуются отрицательным трендом, во-вторых, изменения льда в сентябре имеют наибольшую амплитуду и, в-третьих, тенденция сокращения протяжённости сильнее проявлена в сентябре. Численно тренд сокращения протяжённости льда в марте составляет 2,9% за декаду, в сентябре -11,3%, причём сентябрьский тренд как в относительном (в процентах), так и в абсолютном выражении ( $-78700\pm7500$  км<sup>2</sup> в год) больше, чем тренд, характеризующий изменение площади арктических льдов в целом.

Сокращение протяжённости льда в сентябре привлекало в последние годы наибольшее внимание. Первый минимум, вызвавший горячие обсуждения, наблюдался в сентябре 2007 г., когда разница в протяжённости ледяного покрова с предыдущим 2006 г. была около 1,6 млн км<sup>2</sup>. В рекордный минимум 2012 г. протяжённость ледяного покрова сократилась до 4,4 млн км<sup>2</sup> (среднемесячное значение), т.е. лёд занимал площадь на 36% меньше, чем в среднем в сентябре за весь период спутниковых наблюдений. С одной стороны, причинами столь резких изменений в состоянии льда в конце летнего сезона были уникальные атмосферные условия, как динамические, выражавшиеся в преобладании интенсивных ветров, способствовавших усилению выноса льдов, так и термодинамические, выражавшиеся в аномальном увеличении температуры воздуха, препятствовавшем нарастанию льда в одних областях зимой и способствовавшем интенсивному таянию в других областях летом (Comiso et al., 2008; Parkinson, Comiso, 2013; Polyakov et al., 2012; Serreze, Stroeve, 2015; Stroeve et al., 2008). С другой стороны, одним из главных факторов всё более интенсивного сокращения сентябрьского ледяного покрова является уменьшение толщины льда в целом в Арктике (Maslanik et al., 2007; Nghiem et al., 2007), что делает его более уязвимым при воздействии ветра, а также облегчает таяние.



*Рис. 1.* Изменение протяжённости морских льдов в Арктике согласно спутниковым наблюдениям за период с декабря 1979 по октябрь 2017 г.



*Рис. 2.* Аномалии (отклонения от средних) протяжённости ледяного покрова с декабря 1979 по октябрь 2017 г.

# Сокращение продолжительности ледового сезона, изменение сроков таяния и замерзания

Микроволновые спутниковые измерения позволяют оценить изменение продолжительности ледового сезона (если её считать как время, в течение которого соответствующая область была покрыта льдом со сплочённостью как минимум 15%). Анализ данных показывает, что эта характеристика по-разному изменялась в разных частях Арктики, но в целом она сократилась в значительной части Северного ледовитого океана (СЛО). Площадь, где продолжительность ледового сезона сокращалась со скоростью как минимум пять дней за декаду, составляет 12,4 млн км<sup>2</sup>, а площадь, где продолжительность ледового сезона увеличивалась с такой же скоростью, составляет 1,1 млн км<sup>2</sup> (Parkinson, 2014). Если взять бо́льшие скорости сокращения/увеличения, контраст между соответствующими площадями будет значительно больше. С одной стороны, базовые черты ледяного покрова, такие как покрытие льдом центральной части СЛО в течение всего года и свободная ото льда область к северо-востоку от Скандинавии, сохраняются, с другой стороны, наблюдаются и существенные изменения, произошедшие с начала спутниковых наблюдений. Так, область круглогодичного распространения льдов сократилась, часть Баренцева и Охотского морей стала свободной ото льда в течение всего года, а также протяжённость ледового сезона сократилась в морях Российской Арктики. Во многих окраинных морях продолжительность ледового сезона сокращалась со скоростью большей, чем пять дней за декаду. В северо-восточной части Баренцева моря скорость сокращения превысила 60 дней за декаду. Область, где ледовый сезон стал длиннее, это Берингово море, и скорость удлинения составила там 5-15 дней за декаду (Parkinson, 2014).

С продолжительностью ледового сезона непосредственно связаны сроки наступления таяния и замерзания в Арктике. Естественно ожидать, что сокращению продолжительности ледового сезона сопутствуют более раннее наступление таяния арктических льдов и более позднее замерзание. Именно это показывают данные наблюдений. Тенденция всё более раннего наступления таяния продемонстрирована в статьях (Markus et al., 2009; Stroeve et al., 2014; Wang et al., 2013) на основе анализа данных микроволновых пассивных спутниковых наблюдений. С 1979 по 2013 г. сезон таяния в Арктике удлинялся с трендом в среднем пять дней за декаду (Stroeve et al., 2014). Наиболее сильно тенденция более раннего таяния проявлена в Баренцевом и Гренландском морях. Замерзание наступает всё позже; например, в морях Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском замерзание наступало позже с трендом в среднем от 6 до 11 дней за декаду, а для некоторых областей Баренцева моря получен тренд запаздывания таяния 40 дней за декаду (*puc. 3*).



*Рис. 3.* Тенденции изменения сроков таяния (*a*) и замерзания (*б*), в днях за декаду. Источник: Stroeve et al., 2014

Когда в Арктике начинается таяние, альбедо ледяного покрова значительно уменьшается, что приводит к увеличению поглощения солнечной энергии ледяным покровом. Кроме того, стаявший лёд освобождает воду, меняя соотношение площадей вода/лёд, уменьшая таким образом общее альбедо поверхности и увеличивая поглощение поверхностным слоем воды. Согласно работе (Stroeve et al., 2014), вследствие удлинившегося сезона таяния СЛО поглотил дополнительно около 752 МДж·м<sup>-2</sup> солнечной радиации в течение последнего десятилетия, что должно было увеличить температуру поверхностного слоя воды на 0,5–1,5 °C. Это объясняет задержку в наступлении осеннего замерзания.

# Изменение соотношения возрастных градаций арктических льдов

Сокращение протяжённости сентябрьского ледяного покрова, о котором говорилось выше, означает, что должна была также сократиться протяжённость многолетнего льда (льда, пережившего летнее таяние). Получение характеристик многолетнего льда, его протяжённости, площади и сплочённости возможно с использованием разных спутниковых данных и с помощью разных подходов к их обработке.

Мониторинг возраста льда, а также изменений в соотношении классов льдов, определяемых возрастом, можно вести, используя расчёты по модели, отслеживающей появление льда, его движение и исчезновение (Fowler et al., 2004) на основе спутниковых измерений. В вычислениях используются микроволновые спутниковые данные, упомянутые выше, с помощью которых определяется распространение льда в Арктике, а также (совместно с наблюдениями прибора AVHRR и данными с буёв, дрейфующих в Арктике) строятся карты дрейфа льда. Расчёты по указанной модели позволили получить временной ряд недельных карт возраста льда для градаций возраста от пяти лет и меньше за время спутниковых наблюдений (Tschudi et al., 2016), доступный по ссылке https://daacdata.apps.nsidc.org/pub/DATASETS/ nsidc0611\_seaice\_age\_v3.

Карты, показывающие распределение льдов по возрастным градациям в сентябре 1984, 2000 и 2015 гг. (по окончании таяния) и в марте 1985, 2001 и 2016 гг. (на время максимального распространения ледяного покрова в последующий зимний сезон), приведены на *рис. 4*. Разными цветами показаны льды разных возрастов: от однолетних до самых старых (пять лет и старше). Оценки процентного соотношения старых льдов (старше пяти лет) и остальных возрастных групп на момент максимального распространения льдов (в марте) показывают, что в 1985 г. 16% площади ледяного покрова занимали старые льды, а к 2016 г. их площадь сократилась до 1,2%. Резкое уменьшение площади наиболее старых льдов произошло после минимума ледяного покрова, наблюдавшегося в сентябре 2007 г., и через несколько сезонов следующее значительное сокращение площади старых льдов наблюдалось после сентября 2012 г. Однолетний лёд стал доминирующей возрастной категорией (78% в марте 2016 г.), а количество многолетнего льда существенно сократилось за период спутниковых наблюдений (см. *рис. 4*). Площадь двух- и трёхлетних льдов в последние годы меняется от года к году в диапазоне до 10% от занимаемой ими площади, но в остальном соотношение возрастных категорий не меняется.

Другие способы получения данных о возрасте льда (правда, позволяющие лишь разделить лёд на две градации: однолетний и многолетний) — это 1) обработка микроволновых спутниковых данных пассивного дистанционного зондирования с помощью алгоритмов, использующих различия в излучательной способности однолетних и многолетних льдов (Comiso, 2002, 2012; Grenfell, 1992; Johannessen et al., 1999; Hao, Su, 2015; Lee et al., 2017); 2) обработка данных скаттерометров, основанных на разнице отражённого сигнала скаттерометра от льдов разных возрастных категорий (Kwok, 2004, 2007; Nghiem et al., 2007), а также 3) совместная обработка упомянутых данных, когда проблемы, возникающие при обработке одних данных, пытаются решить, подключая другие данные (Aaboe et al., 2017; Breivik, Eastwood, 2009; Lindel, Long, 2016; Shalina, Johannessen, 2008; Swan, Long, 2012). Данные скаттерометров, используемые в этих исследованиях, — это данные сенсоров SeaWinds (был установлен на спутнике QuikSCAT), ASCAT (Metop-A) и OSCAT. Результаты получают для зимнего сезона, вне сезона таяния.



*Рис. 4.* Пространственное распределение и изменение соотношения льдов разного возраста с 1984 по 2016 г. Карты верхнего ряда описывают ситуацию середины сентября, нижнего — ситуацию середины марта. Источник: NSIDC, набор данных nsidc0611\_seaice\_age\_v3

Сложности получения данных об описанных типах льдов, сопутствующие указанным алгоритмам, состоят в том, что используемые в алгоритмах свойства этих ледовых классов имеют сезонную и пространственную изменчивость, которая до конца не известна. Разные алгоритмы используют различные походы к удалению ложных сигналов, показывающих многолетний лёд, которые возникают при вычислениях. В итоге разница в площадях многолетних льдов, полученных в рамках разных исследований, достигает 1 млн км<sup>2</sup>. При этом тенденция, состоящая в том, что площадь многолетних льдов уменьшалась на промежутке времени от начала спутниковых наблюдений (это разные точки отсчёта для пассивных и активных спутниковых наблюдений) до 2008 г., отмечается во всех исследованиях, а трансформации, происходящие с многолетним льдом в последние годы, описываются в разных работах по-разному. Если рассматривать весь период спутниковых наблюдений, то все алгоритмы показывают существенное сокращение площади многолетних льдов.

Таким образом, за период спутниковых наблюдений в Арктике стало меньше самого старого и самого толстого арктического льда, что делает ледовое покрытие менее устойчивым к воздействию внешних факторов и более подверженным таянию, а также разрушению и выносу за счёт дрейфа. Сокращение многолетнего льда и всё усиливающееся преобладание относительно тонких однолетних льдов является одним из самых значительных изменений, произошедших в Арктике за последние десятилетия. Кроме прочего, это означает уменьшение объёма льда в Арктике (Alexeev et al., 2013; Kwok, Cunningham, 2015; Kwok et al., 2009; Laxon et al., 2013).

#### Уменьшение толщины арктических льдов

Кроме протяжённости ледяного покрова Арктики важным параметром льдов СЛО, определяющим баланс ледовой массы, является их толщина. К сожалению, глобальные наблюдения за толщиной льдов в Арктике весьма ограничены по сравнению с наблюдениями за протяжённостью ледяного покрова. Лишь в последние 15 лет с запуском спутников, сфокусированных на измерениях толщины льда, появились данные, покрывающие всю Арктику. До того данные о толщине льдов получали при измерениях сонарами, установленными на подводных лодках или закреплёнными на дне океана, с помощью электромагнитных измерений с самолётов, а также во время различных арктических экспедиций. Данные, полученные при бурении льдов во время арктических экспедиций, следует признать наиболее точными сведениями о толщине льда, однако эти данные не составляют однородного ряда, так как они нерегулярны по времени и разбросаны в арктическом пространстве.

Распределение льдов по возрасту и толщине в значительной степени обусловлено особенностями их дрейфа, а именно антициклоническим дрейфом льдов в районе моря Бофорта и Трансарктическим дрейфом. Отметим, что анализ спутниковых данных показывает существенное увеличение скорости дрейфа льдов в Арктике после 2000 г., особенно в области, занятой однолетними льдами (Kwok et al., 2013). Льды, вовлечённые в круговорот Бофорта, могут находиться в нём достаточно долго, вследствие чего частная сплочённость толстых многолетних льдов в канадско-гренландском районе Арктики наибольшая. Кроме того, льды в этом районе отличаются высокой торосистостью. Толщина дрейфующего льда формируется в результате термодинамических процессов, а также в результате торошения при взаимодействии льдин друг с другом. Многолетний лёд имеет наибольшую толщину. Однолетний (сезонный лёд) имеет разную толщину в зависимости от стадии его развития. Лёд, толщина которого зависит преимущественно от термодинамических процессов, — это припай.

Спутниковый данные о толщине льдов Арктики, накопленные к настоящему моменту, включают данные измерений на спутнике ICESat (Cloud and Land Elevation Satellite), проводившем измерения с 2003 по 2009 г., где работал лазерный альтиметр, и на спутнике CryoSat-2, который был запущен в апреле 2010 г. и продолжает измерения по сей день, и где работает радар-альтиметр. К сожалению, эти приборы не имели пересекающегося периода функционирования, что облегчило бы сравнение результатов их измерений.

Анализ данных десяти серий измерений альтиметра ICESat (пять из которых проводились осенью и пять зимой) продемонстрировал, что толщина многолетнего льда осенью/зимой сократилась с 3,0/3,4 м в 2003 г. до 2,3/2,8 м в 2008 г., т. е. в среднем примерно на 60 см, а толщина однолетнего льда осталась в среднем неизменной и составляла 1,4/2,1 м осенью/зимой (Kwok et al., 2009). Сопоставление этих данных с измерениями CryoSat-2 проводилось в разных работах (Kwok, Cunningham, 2015; Laxon et al., 2013; Wang et al., 2016). В перечисленных работах данные, полученные с помощью спутниковых альтиметров, сравнивались с расчётами по модели PIOMAS, которая описывает взаимодействие ледяного покрова и океана, причём ассимилирует оперативные данные о сплочённости льда и его дрейфе с измерениями буёв, сонаров, с самолётными измерениями, с данными, полученными в рамках кампании IceBridge, и др. К сожалению, все сравниваемые данные имеют свои погрешности и особенности, так что полученная информация о расхождениях между разными результатами не позволяет дать однозначное заключение о точности данных, полученных с помощью разных альтиметров.

Картина изменения толщины льда по данным CryoSat-2 за четыре зимних сезона с 2011 по 2014 г. приведена в работах (Kwok, Cunningham, 2015; Tilling et al., 2015). Показано, что с 2011 по 2013 г. средняя толщина льда менялась в русле предыдущих изменений, т. е. сокращалась, причём в основном — за счёт толщины многолетнего льда. Однако зима 2014 г. продемонстрировала увеличение средней толщины льда, что было обусловлено, во-первых, холодным летом 2013 г. и, во-вторых, необычным развитием дрейфа льдов у побережья Канады, способствовавшем накоплению в этой области многолетних льдов, их задержке в указанной области и торошению. В результате средняя толщина многолетнего льда в Арктике к концу зимы 2014 г. превысила 4 м, а у берегов Канады толщина льдов превышала 5 м (Kwok, Cunningham 2015). Карты толщины льда, поставляемые в режиме реального времени, построенные на базе измерений CryoSat-2 (Tilling et al., 2016) для зимних месяцев и доступные на сайте британского Центра полярных исследований СРОМ http://www.cpom.ucl.ac.uk/csopr/ seaice.html, приведены на *рис.* 5. Видно, что увеличение толщины льда зимой 2014 г. сменилось постепенным её сокращением и достижением распределения, примерно соответствующего 2012–2013 гг.



*Puc. 5.* Распределение толщины льда в Арктике по данным измерений радара-альтиметра CryoSat-2. Источник: http://www.cpom.ucl.ac.uk/csopr/seaice.html/

#### Заключение

Наши знания об изменениях, произошедших с ледяным покровом Арктики в последние десятилетия, базируются в основном на спутниковых данных. Именно благодаря спутниковым измерениям мы можем построить глобальную картину происходящих там явлений. Спутниковые наблюдения показывают, что протяжённость ледяного покрова Арктики сокращается со средней скоростью 4,5% за десятилетие, при этом основной вклад в это сокращение вносит процесс уменьшения протяжённости льдов, переживших летнее таяние, который происходит со скоростью 11,3% за десятилетие. Постепенное уменьшение количества льдов, переживших летнее таяние, определило изменение процентного соотношения между однолетними и многолетними льдами. Спутниковые наблюдения показывают, что в настоящее время однолетние льды преобладают в ледяном покрытии Арктики на момент его максимального развития: в марте 2016 г. 78% льдов были однолетними. Площадь льдов старше пяти лет уменьшилась с 16% в середине 1980-х гг. до 1,2% к 2016 г. Однолетние льды тоньше многолетних и потому легче тают, причём таяние весной теперь начинается раньше, а замерзание осенью — позже, чем несколько десятков лет назад. Изменение ледовой динамики СЛО также связано с утоньшением льдов. Тонкие льды более мобильны и более подвержены разрушению под действием ветров и волн. Спутниковые измерения показывают существенное увеличение скорости дрейфа льдов в Арктике после 2000 г. Спутниковый ряд измерений толщины арктических льдов короток и неоднороден, но, будучи помещён в контекст всех имеющихся на данный момент измерений, дополняет картину, которая показывает сокращение толщины льдов Арктики в течение последних десятилетий.

Работа выполнена в рамках проекта «Суда и волны в полярных регионах», являющегося частью Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы», Соглашение № 14.618.21.0005 от 18 ноября 2015 г. Уникальный идентификатор проекта: RFMEFI61815X0005.

# Литература

- 1. *Асмус В. В., Милехин О. Е., Кровотынцев В. А., Селиванов А. С.,* Использование радиолокационных данных ИСЗ серии Океан для решения задач гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды // Исследование Земли из космоса. 2002. № 3. С. 63–70.
- 2. *Шалина Е. В.* Сокращение ледяного покрова Арктики по данным спутникового пассивного микроволнового зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 328–336.
- 3. Шалина Е.В. Изменение ледовитости северных морей России и повышение доступности Северного морского пути по данным спутникового мониторинга // Исследование Земли из космоса. 2015. № 4. С. 67–78.
- 4. *Aaboe S., Breivik L.-A., Sørensen A., Eastwood S., Lavergne Th.* Global Sea Ice Edge and Type: Product User's Manual. OSI-402-c and OSI-403-c. 2017. 43 p. URL: http://osisaf.met.no/docs/osisaf\_cdop3\_ss2\_pum\_sea-ice-edge-type\_v2p2.pdf/.
- 5. *Alexeev V.A., Ivanov V.V., Kwok R., Smedsrud L.* H. North Atlantic warming and declining volume of arctic sea ice // The Cryosphere Discuss. 2013. V. 7, P. 245–265. DOI:10.5194/tcd-7-245-2013.
- 6. *Bekryaev R. V., Polyakov I. V., Alexeev V.A.* Role of Polar Amplification in Long-Term Surface Air Temperature Variations and Modern Arctic Warming // J. Climate. 2010. V. 23. P. 3888–3906.
- 7. *Breivik L.-A., Eastwood S.* Upgrade of the OSI SAF sea ice edge and sea ice type products Introduction of ASCAT: Tech. Rep. Norwegian Meteorological Institute, 2009.
- Cavalieri D. J., Parkinson C. L., Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010 // Cryosphere. 2012. V. 6. P. 881–889. DOI:10.5194/tc-6-881-2012.
- *Comiso J. C.* A rapidly declining perennial sea ice cover in the Arctic // Geophysical Research. Letters. 2002. V. 29. Iss. 20. P. 1956. DOI:10.1029/2002GL015650.
- Comiso J. Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover // J. Climate. 2012. V. 25. Iss. 4. P. 1176– 1193. DOI:10.1175/JCLI-D-11-00113.1.
- 11. Comiso J., Parkinson C. L., Gersten R., Stock L. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover // Geophysical Research Letters. 2008. Vol. 35. Iss. 1. P. L01703. DOI:10.1029/2007GL031972.
- 12. *Fowler C., Emery W., Maslanik J.A.* Satellite-derived evolution of Arctic sea ice age: October 1978 to March 2003 // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing Letters. 2004. Vol. 1. Iss. 2. P. 71–74.
- Grenfell T. C. Surface-based passive microwave studies of multiyear sea ice // J. Geophysical Research. 1992. V. 97. Iss. C3. P. 3485–3501. DOI:10.1029/91JC02651.
- 14. *Hao G., Su J.* A study of multiyear ice concentration retrieval algorithms using AMSR-E data // Acta Oceanologica Sinica. 2015. V. 34. Iss. 9. P. 102–109. DOI:10.1007/s13131-015-0656-1.
- 15. Johannessen O. M., Shalina E. V., Miles M. W. Satellite evidence for an Arctic sea ice cover in transformation // Science. 1999. V. 286. P. 1936–1938.
- Johannessen O. M., Kuzmina S., Bobylev L., Miles M. Surface air temperature variability and trends in the Arctic: new amplification assessment and regionalization // Tellus A. 2016. V. 68. P. 28234. URL: http:// dx.doi.org/10.3402/tellusa.v68.28234.
- 17. *Kwok R*. Annual cycles of multiyear sea ice coverage of the Arctic Ocean: 1999–2003 // J. Geophysical Research. 2004. V. 109. C11004. DOI:10.1029/2003JC002238.
- 18. *Kwok R*. Near zero replenishment of the Arctic multiyear sea ice cover at the end of 2005 summer // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. L05501. DOI:10.1029/2006GL028737.
- 19. *Kwok R., Cunningham G. F.* Variability of Arctic sea ice thickness and volume from CryoSat-2 // Philosophical Transactions of the Royal Society. 2015. V. 373. Iss. 2014. P. 20140157–20140157. URL: http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0157/.
- Kwok R., Cunningham G. F., Wensnahan M., Rigor I., Zwally H.J., Yi D. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008 // J. Geophysical Research. 2009. V. 114. Iss. C7. CiteID C07005. DOI:10.1029/2009JC005312.
- 21. *Kwok R.*, *Spreen G.*, *Pang S.* Arctic sea ice circulation and drift speed: Decadal trends and ocean currents // J. Geophysical Research. Oceans. 2013. Vol. 118. P. 2408–2425. DOI:10.1002/jgrc.20191.
- Laxon S. W., Giles K. A., Ridout A. L., Wingham D. J., Willatt R., Cullen R., Kwok R., Schweiger A., Zhang J., Haas C., Hendricks S., Krishfield R., Kurtz N., Farrell S., Davidson M. CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume // Geophysical Research Letters. 2013. V. 40. P. 732–737. DOI:10.1002/grl.50193.
- Lee S.-M., Sohn B.-J., Kim S.-J. Differentiating between first-year and multiyear sea ice in the Arctic using microwave-retrieved ice emissivities // J. Geophysical Research Atmospheres. 2017. V. 122. P. 5097–5112. DOI:10.1002/2016JD026275.
- 24. *Lindell D. B.*, *Long D. G.* Multiyear Arctic sea ice classification using OSCAT and QuikSCAT // IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing. 2016. V. 54. P. 167–175.

- 25. *Lu J.*, *Cai M.* Quantifying contributions to polar warming amplification in an idealized coupled general circulation model // Climate Dynamics. 2010. V. 34. P. 669–687.
- 26. *Markus T., Stroeve J. C., Mille J.* Recent changes in Arctic sea ice melt onset, freezeup, and melt season length // J. Geophysical Research. 2009. V. 114. Iss. C12. DOI:10.1029/2009JC005436.
- Maslanik J.A., Fowler C., Stroeve J., Drobot S., Zwally J., Yi D., Emery W. A younger, thinner Arctic ice cover: Increased potential for rapid, extensive sea-ice loss // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. DOI:10.1029/2007GL032043.
- 28. *Meier W.N., Stroeve J., Fetterer F.* Whither Arctic sea ice? A clear signal of decline regionally, seasonally and extending beyond the satellite record // Annals of Glaciology. 2007. V. 46. P. 428–434. DOI:10.3189/172756407782871170.
- 29. Nghiem S. V., Rigor I. G., Perovich D. K., Clemente-Colon P., Weatherly J. W., Neumann G. Rapid reduction of Arctic perennial sea ice // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. Iss. L19. DOI:10.1029/2007GL031138.
- 30. *Parkinson C. L.* Spatially mapped reductions in the length of the Arctic sea ice season. // Geophysical Research Letters. 2014. V. 41. P. 4316–4322. DOI:10.1002/2014GL060434.
- 31. *Parkinson C. L., Comiso J.* On the 2012 record low Arctic sea ice cover: Combined impact of preconditioning and an August storm // Geophysical Research Letters. 2013. V. 40. P. 1356–1361. DOI:10.1002/grl.50349.
- 32. Parkinson C. L., Cavalieri D. J., Gloersen P., Zwally H. J., Comiso J. C. Arctic sea ice extents, areas, and trends, 1978–1996 // J. Geophysical Research. 1999. V. 104. Uss. C9. P. 20837–20856. DOI:10.1029/1999JC900082.
- 33. *Pithan F., Mauritsen T.* Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models // Nature Geoscience. 2014. V. 7. P. 181–184.
- 34. *Polyakov I. V., Walsh J., Kwok R.* Recent changes of arctic multiyear sea-ice coverage and the likely causes // Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS). 2012. DOI:10.1175/BAMS-D-11-00070.1.
- 35. *Serreze M. C., Barry R. G.* Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis // Global and Planetary Change. 2011. V. 77. P. 85–96.
- Screen J.A., Francis J. Contribution of sea-ice loss to Arctic amplification is regulated by Pacific Ocean decadal variability // Nature Climate Change. 2016. V. 6. P. 856–860. http://dx.doi.org/10.1038/ nclimate3011.
- 37. *Screen J.A., Simmonds I.* The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification // Nature. 2010. V. 464. P. 1334–1337.
- Serreze M. C., Stroeve J. Arctic sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2015. V. 373. P. 20140159. http://dx.doi.org/10.1098/ rsta.2014.0159/.
- Shalina E. V., Johannessen O. M. Multiyear sea ice concentration mapping using passive and active microwave satellite data // IEEE Xplore, Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (MicroRad 2008). 2008. DOI:10.1109/MICRAD.2008.4579513.
- 40. *Stroeve J., Serezze M., Drobot S., Gearheard S., Holland M., Maslanik J., Meier W., Scambos T.* Arctic sea ice extent plummets in 2007 // EOS Trans. American Geophysical Union. 2008. V. 89. P. 13–20.
- 41. Stroeve J. C., Serreze M. C., Holland M. M., Kay J. E., Maslanik J., Barrett A. P. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis // Climatic Change. 2012. V. 110. Iss. 3-4. P. 1005–1027. DOI:10.1007/s10584-011-0101-1.
- 42. *Stroeve J. C., Markus T., Boisvert L., Miller J., Barrett A.* Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss // Geophysical Research Letters. 2014. V. 41. P. 1216–1225. DOI:10.1002/2013GL058951.
- Svendsen E., Kloster K., Farrelly B., Johannessen O. M., Johannessen J. A., Campbell W.J., Gloersen P., Cavalieri D. J., Matzler C. Norwegian Remote Sensing Experiment: Evaluation of the Nimbus-7 SMMR for sea ice research // J. Geophysical Research. 1983. V. 88. Iss. C5. P. 2781–2791.
- 44. *Swan A. M., Long D. G.* Multiyear arctic sea ice classification using QuikSCAT // IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing. 2012. V. 50. P. 3317–3326.
- 45. *Taylor P. K., Katsaros K. B., Lipes R. G.* Determinations by Seasat of atmospheric water and synoptic fronts // Nature. 294. 1981. P. 737–739. DOI:10.1038/294737a0.
- 46. *Tilling R. L., Ridout A., Shepherd A., Wingham D. J.* Increased Arctic sea ice volume after anomalously low melting in 2013 // Nature Geoscience. 2015. V. 8. P. 643–646. DOI:10.1038/ngeo2489.
- 47. *Tilling R. L., Ridout A., Shepherd A.* Near-real-time Arctic sea ice thickness and volume from CryoSat-2 // The Cryosphere. 2016. V. 10. P. 2003–2012. https://doi.org/10.5194/tc-10-2003-2016/.
- 48. *Tschudi M., Fowler C., Maslanik J., Stewart J. S., Meier W.* EASE-Grid Sea Ice Age, Version 3. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2016. DOI:http://dx.doi.org/10.5067/PFSVFZA9Y85G.
- Vinnikov K., Robock A., Stouffer R.J., Walsh J. E., Parkinson C. L., Cavalieri D.J., Mitchell J. F.B., Garrett D., Zakharov V. F. Global warming and Northern Hemisphere sea ice extent // Science. 1999. V. 286. P. 1934–1937.

- 50. *Wang L. C. Brown D. R., Markus T.* Recent changes in pan-Arctic melt onset from satellite passive microwave measurements // Geophysical Research Letters. 2013. V. 40. P. 522–528. DOI:10.1002/grl.50098.
- 51. *Wang X., Key J., Kwok R., Zhang J.* Comparison of Arctic Sea Ice Thickness from Satellites, Aircraft, and PIOMAS Data // Remote Sensing. 2016. V. 8. P. 713.

## Sea ice transformations in the Arctic from satellite observations

# E. V. Shalina<sup>1,2</sup>, L. P. Bobylev<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre, St. Petersburg, Russia

 <sup>2</sup> St. Petersburg State University. Institute of Earth Sciences, St. Petersburg, Russia
<sup>3</sup> Nansen Environmental and Remote Sensing Center, Bergen, Norway E-mail: elena.shalina@niersc.spb.ru; leonid.bobylev@niersc.spb.ru

Satellite observations help to reveal critical polar sea ice changes. Passive microwave measurements have been used to estimate sea ice extent, the length of the sea ice season, sea ice velocities, and to determine the timing of the seasonal onset of melt in spring and freeze in autumn. Satellite data show that over the past 39 years Arctic sea ice cover has been declining by 4.5 percent per decade on the average, by 2.9 percent her decade in March, when the sea ice reaches its maximum extent, and by 11.3 percent per decade in September, the month that marks the end of the summer melt season. Revealed distribution of ice of different ages demonstrates the extensive loss in recent years of the older ice types. The proportion of sea ice five years or older has declined dramatically over the satellite time period, from more than 16 percent of the March ice in the 1980s to 1.2 percent in 2016. A growing percentage of Arctic sea ice is only one or two years old. Less old multiyear ice and increased area of first-year ice implies that the ice cover is thinning, which makes it more vulnerable to further melting. Since the beginning of satellite passive microwave data record, the length of the melt season for Arctic sea ice has grown, sea ice starts melting earlier by 5 days per decade and it starts refreezing later by 6–11 days per decade, on average.

**Keywords:** Arctic sea ice, satellite observations, passive microwave, sea ice extent, sea ice thickness, sea ice age, melt onset, freezeup, global warming

Accepted: 30.11.2017 DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-28-41

## References

- Asmus V.V., Milekhin O.E, Krovotyncev V.A., Selivanov A.S., Ispol'zovanie radiolokacionnyh dannyh ISZ serii Okean dlya resheniya zadach gidrometeorologii I monitoring okruzayuschei sredy (Use of Ocean satellite data for hydrometeorology and environment monitoring), *Issledovanie Zemli iz cosmosa*, 2002, No. 3, pp. 63–70.
- Shalina E. V., Sokraschenie ledyanogo pokrova Arktiki po dannym sputnikovogo passivnogo mikrovolnovogo zondirovaniya (Arctic sea ice decline from satellite passive microwave observations), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 328–336.
- 3. Shalina E.V., Izmenenie ledovitosti severnyh morei Rossii I povyshenie dostupnosti Severnogo morskogo puti po dannym sputnokovogo monitoringa (Change of ice concentration in the Northern seas of the Russian Arctic and opening of the Northern Sea Route from satellite data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 4, pp. 67–78.
- 4. Aaboe S., Breivik L.-A., Sørensen A., Eastwood S., Lavergne Th. *Global Sea Ice Edge and Type*: Product User's Manual. OSI-402-c and OSI-403-c, 2017, 43 p., URL: http://osisaf.met.no/docs/osisaf\_cdop3\_ss2\_pum\_sea-ice-edge-type\_v2p2.pdf.
- Alexeev V.A., Ivanov V.V., Kwok R., Smedsrud L. H., North Atlantic warming and declining volume of arctic sea ice, *The Cryosphere Discuss*, 2013, Vol. 7, pp. 245–265. DOI:10.5194/tcd-7-245-2013.
- 6. Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A., Role of Polar Amplification in Long-Term Surface Air Temperature Variations and Modern Arctic Warming, *J. Climate*, 2010, Vol. 23, pp. 3888–3906.

- 7. Breivik L.-A., Eastwood S., *Upgrade of the OSI SAF sea ice edge and sea ice type products Introduction of ASCAT*: Tech. Rep., Norwegian Meteorological Institute, 2009.
- 8. Cavalieri D.J., Parkinson C.L., Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010, *Cryosphere*, 2012, Vol. 6, pp. 881–889. DOI:10.5194/tc-6-881-2012.
- 9. Comiso J. C., A rapidly declining perennial sea ice cover in the Arctic, *Geophysical Research Letters*, 2002, Vol. 29, Issue 20, pp. 1956. DOI:10.1029/2002GL015650.
- 10. Comiso J., Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover, J. Climate. 2012, Vol. 25, Iss., 4, pp. 1176–1193. DOI:10.1175/JCLI-D-11-00113.1.
- 11. Comiso J., Parkinson C. L., Gersten R., Stock L., Accelerated decline in the Arctic sea ice cover, *Geophysical Research Letters*, 2008, Vol. 35, Issue 1, p. L01703. DOI:10.1029/2007GL031972.
- 12. Fowler C., Emery W., Maslanik J.A., Satellite-derived evolution of Arctic sea ice age: October 1978 to March 2003, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, Vol. 1, Issue 2, pp. 71–74.
- 13. Grenfell T.C., Surface-based passive microwave studies of multiyear sea ice, *J. Geophysical Research*, 1992, Vol. 97, Issue C3, pp. 3485–3501. DOI:10.1029/91JC02651.
- 14. Hao G., Su J., A study of multiyear ice concentration retrieval algorithms using AMSR-E data, *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, Vol. 34, Issue 9, pp. 102–109. DOI:10.1007/s13131-015-0656-1.
- 15. Johannessen O. M., Shalina E. V., Miles M. W., Satellite evidence for an Arctic sea ice cover in transformation, *Science*, 1999, Vol. 286, pp. 1936–1938.
- Johannessen O. M., Kuzmina S., Bobylev L., Miles M., Surface air temperature variability and trends in the Arctic: new amplification assessment and regionalization, *Tellus A*, 2016, Vol. 68, p. 28234, http://dx.doi. org/10.3402/tellusa.v68.28234/.
- 17. Kwok R., Annual cycles of multiyear sea ice coverage of the Arctic Ocean: 1999–2003, J. Geophysical Research, 2004. Vol. 109, C11004. DOI:10.1029/2003JC002238.
- 18. Kwok R., Near zero replenishment of the Arctic multiyear sea ice cover at the end of 2005 summer, Geophysical Research Letters, 2007, V. 34, L05501. DOI:10.1029/2006GL028737.
- 19. Kwok R., Cunningham G.F., Variability of Arctic sea ice thickness and volume from CryoSat-2, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 2015, Vol. 373, Issue 2014, pp. 20140157–20140157, URL: http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0157/.
- Kwok R., Cunningham G. F., Wensnahan M., Rigor I., Zwally H. J., Yi D., Thinning and volume loss of the ArcticOcean sea ice cover: 2003–2008, *J. Geophysical Research*, 2009, Vol. 114, Issue C7, CiteID C07005. DOI:10.1029/2009JC005312.
- 21. Kwok R., Spreen G., Pang S., Arctic sea ice circulation and drift speed: Decadal trends and ocean currents, *J. Geophysical Research Oceans*, 2013, Vol. 118, pp. 2408–2425. DOI:10.1002/jgrc.20191.
- Laxon S. W., Giles K. A., Ridout A. L., Wingham D. J., Willatt R., Cullen R., Kwok R., Schweiger A., Zhang J., Haas C., Hendricks S., Krishfield R., Kurtz N., Farrell S., Davidson M., CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume, *Geophysical Research Letters*, 2013, Vol. 40, pp. 732–737. DOI:10.1002/ grl.50193.
- 23. Lee S.-M., Sohn B.-J., Kim S.-J., Differentiating between first-year and multiyear sea ice in the Arctic using microwave-retrieved ice emissivities, *J. Geophysical Research Atmospheres*, 2017, Vol. 122, pp. 5097– 5112. DOI:10.1002/2016JD026275.
- 24. Lindell D.B., Long D.G., Multiyear Arctic sea ice classification using OSCAT and QuikSCAT, *IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing*, 2016, Vol. 54, pp. 167–175.
- 25. Lu J., Cai M., Quantifying contributions to polar warming amplification in an idealized coupled general circulation model, *Climate Dynamics*, 2010, Vol. 34, pp. 669–687.
- 26. Markus T., Stroeve J. C., Mille J., Recent changes in Arctic sea ice melt onset, freezeup, and melt season length, *J. Geophysical Research*, 2009, Vol. 114, Issue C12. DOI:10.1029/2009JC005436.
- 27. Maslanik J., Stroeve J., Fowler C., Emery W., Distribution and trends in Arctic sea ice age through spring 2011. *Geophysical Research Letters*, 2011, Vol. 38, Issue L13. DOI:10.1029/2011GL047735.
- 28. Meier W.N., Stroeve J., Fetterer F., Whither Arctic sea ice? A clear signal of decline regionally, seasonally and extending beyond the satellite record. *Annals of Glaciology*, 2007, Vol. 46, pp. 428–434. DOI:10.3189/172756407782871170.
- 29. Nghiem S.V., Rigor I.G., Perovich D.K., Clemente-Colon P., Weatherly J.W., Neumann G., Rapid reduction of Arctic perennial sea ice, *Geophysical. Research Letters*. 2007. Vol. 34, Issue L19. DOI:10.1029/2007GL031138.
- 30. Parkinson C. L., Spatially mapped reductions in the length of the Arctic sea ice season, *Geophysical Research Letters*, 2014, Vol. 41, pp. 4316–4322. DOI:10.1002/2014GL060434.
- Parkinson C. L., Comiso J., On the 2012 record low Arctic sea ice cover: Combined impact of preconditioning and an August storm, *Geophysical Research Letters*, 2013, Vol. 40, pp. 1356–1361. DOI:10.1002/ grl.50349, 2013.

- Parkinson C. L., Cavalieri D. J., Gloersen P., Zwally H. J., Comiso J. C., Arctic sea ice extents, areas, and trends, 1978–1996, *J. Geophysical Research*, 1999, Vol. 104, Issue C9, pp. 20837–20856. DOI:10.1029/1999JC900082.
- 33. Pithan F., Mauritsen T., Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models, *Nature Geoscience*, 2014, Vol. 7, pp. 181–184.
- 34. Polyakov I. V., Walsh J., Kwok R., Recent changes of arctic multiyear sea-ice coverage and the likely causes, *Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS)*, 2012. DOI:10.1175/BAMS-D-11-00070.1.
- 35. Serreze M. C., Barry R. G., Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis, *Global and Planetary Change*, 2011, Vol. 77, pp. 85–96.
- Screen J. A., Francis J., Contribution of sea-ice loss to Arctic amplification is regulated by Pacific Ocean decadal variability, Nature Climate Change, 2016, V. 6, pp. 856–860, http://dx.doi.org/10.1038/ nclimate3011.
- 37. Screen J.A., Simmonds I., The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification, Nature, 2010, V. 464, pp. 1334–1337.
- Serreze M. C., Stroeve J., Arctic sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2015, Vol. 373, p. 20140159. http://dx.doi.org/10.1098/ rsta.2014.0159/.
- Shalina E. V., Johannessen O. M., Multiyear sea ice concentration mapping using passive and active microwave satellite data // IEEE Xplore, Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (MicroRad 2008). 2008. DOI:10.1109/MICRAD.2008.4579513.
- 40. Stroeve J., Serezze M., Drobot S., Gearheard S., Holland M., Maslanik J., Meier W., Scambos T., Arctic sea ice extent plummets in 2007, *EOS Trans. American Geophysical Union*, 2008, Vol. 89, pp. 13–20.
- 41. Stroeve J. C., Markus T., Boisvert L., Miller J., Barrett A. Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss, *Geophysical Research Letters*, 2014, Vol. 41, pp. 1216–1225. DOI:10.1002/2013GL058951.
- 42. Stroeve J. C., Serreze M. C., Holland M. M., Kay J. E., Maslanik J., Barrett A. P., The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis, *Climatic Change*, 2012, Vol. 110, Issue 3-4, pp. 1005–1027. DOI:10.1007/s10584-011-0101-1.
- Svendsen E., Kloster K., Farrelly B., Johannessen O. M., Johannessen J. A., Campbell W. J., Gloersen P., Cavalieri D. J., Matzler C., Norwegian Remote Sensing Experiment: Evaluation of the Nimbus-7 SMMR for sea ice research, *J. Geophysical Research*, 1983, Vol. 88, Issue C5, pp. 2781–2791.
- 44. Swan A. M., Long D. G., Multiyear arctic sea ice classification using QuikSCAT, *IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing*, 2012, Vol. 50, pp. 3317–3326.
- 45. Taylor P.K., Katsaros K.B., Lipes R.G., Determinations by Seasat of atmospheric water and synoptic fronts, *Nature*, 1981, Vol. 294, pp.737–739. DOI:10.1038/294737a0.
- 46. Tilling R. L., Ridout A., Shepherd A., Near-real-time Arctic sea ice thickness and volume from CryoSat-2, *The Cryosphere*, 2016, Vol. 10, pp. 2003–2012, https://doi.org/10.5194/tc-10-2003-2016/.
- 47. Tilling R. L., Ridout A., Shepherd A., Wingham D. J., Increased Arctic sea ice volume after anomalously low melting in 2013, *Nature Geoscience*, 2015, Vol. 8, pp. 643–646. DOI:10.1038/ngeo2489.
- 48. Tschudi M., Fowler C., Maslanik J., Stewart J.S., Meier W., *EASE-Grid Sea Ice Age, Version 3. Boulder, Colorado USA*, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2016. DOI:http://dx.doi.org/10.5067/PFSVFZA9Y85G.
- 49. Vinnikov K., Robock A., Stouffer R.J., Walsh J.E., Parkinson C.L., Cavalieri D.J., Mitchell J.F.B., Garrett D., Zakharov V.F., Global warming and Northern Hemisphere sea ice extent, *Science*, 1999. Vol. 286, pp. 1934–1937.
- 50. Wang L.C., Brown D.R., Markus T., Recent changes in pan-Arctic melt onset from satellite passive microwave measurements, *Geophysical Research Letters*, 2013, Vol. 40, pp. 522–528. DOI:10.1002/grl.50098.
- 51. Wang X., Key J., Kwok R., Zhang J., Comparison of Arctic Sea Ice Thickness from Satellites, Aircraft, and PIOMAS Data, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, p. 713.