

Экстремальный перенос влаги в тихоокеанский сектор Арктики 26–27 ноября 2019 г. по данным реанализа ERA5 и микроволновых спутниковых измерений

И. А. Гурвич, М. К. Пичугин, А. В. Баранюк

*Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДВО РАН
Владивосток, 690041, Россия
E-mails: gurvich@poi.dvo.ru, pichugin@poi.dvo.ru, baranyuk.av@poi.dvo.ru*

Исследуется влияние южного синоптического процесса на экстремальный перенос водяного пара в тихоокеанский сектор Арктики и ледовые условия Чукотского моря на основе данных усовершенствованного реанализа высокого разрешения ERA5, микроволновых спутниковых измерений и массива данных OISST (*англ.* Optimum Interpolation Sea Surface Temperature) версии 2.1. На основе порогового критерия событие классифицировано как экстремальное с продолжительностью 30 ч и вкладом 30,1 % в общий месячный перенос влаги в ноябре 2019 г. через 67° с. ш. в секторе 180–210° в. д. Статистический анализ за период 2001–2020 гг. выявил 11 подобных экстремальных событий переноса водяного пара в Чукотское море, при этом 72,7 % из них пришлись на последнее десятилетие, что может свидетельствовать об ускорении климатических изменений влагопереноса в Арктику. Событие происходило на фоне устойчивых положительных аномалий температуры морской поверхности в северной части Тихого океана и превышения продолжительности безлёдного периода в Чукотском море более чем на месяц, что связывается с остаточными эффектами морской волны тепла. Значительное сокращение морского льда в северной части Чукотского моря сопровождалось комбинацией динамических факторов (ветры >25 м/с, штормовое волнение), тепловых процессов (адвекция тепла) и радиационных эффектов (предполагаемое усиление нисходящего длинноволнового излучения вследствие увеличения влагосодержания атмосферы). При этом выявленное занижение скорости ветра в данных ERA5 по сравнению со спутниковыми измерениями может приводить к недооценке интенсивности теплообмена «океан–атмосфера». Исследование показывает, что подобные события могут оказывать каскадные эффекты на климатическую систему тихоокеанского сектора Арктики, влияя на гидрологические процессы, состояние морского льда и региональный тепловой баланс.

Ключевые слова: Арктика, Чукотское море, перенос влаги, южный циклон, морская волна тепла, ледовые условия, изменения климата, микроволновые спутниковые измерения, реанализ

Одобрена к печати: 01.12.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-333-348

Введение

Таяние арктических льдов вызвало значительные изменения гидрологических процессов в Арктике (Brunello et al., 2024; Hao et al., 2019; White et al., 2007). Резкое повышение температуры по сравнению со средним мировым уровнем, так называемое арктическое усиление, привело к быстрому снижению ледовитости в тёплый период года, увеличению содержания водяного пара в атмосфере и, как следствие, изменению погодных условий в умеренных широтах (Алексеев и др., 2016; Gimeno-Sotelo et al., 2018, Naakka et al., 2019; Park et al., 2015; Walsh, 2014; Yang, Magnusdottir, 2017). Ожидаемо продолжение этой тенденции в условиях глобального потепления (Алексеев и др., 2016; Vihma et al., 2015). Увеличение транспорта влаги в Арктику привело к нарушению теплового баланса системы «океан–атмосфера», росту температуры воздуха, изменениям в процессах образования и таяния морского льда (Villamil-Otero et al., 2018; Woods, Caballero, 2016). Значимым источником транспорта влаги в Арктику являются атмосферные реки (Newman et al., 2012). Предположительно, сочетание аномально низкой концентрации морского льда в Беринговом проливе поздней осенью 2017 г. и активности атмосферных рек над Тихим океаном частично стало причиной суровой

зимы 2017–2018 гг. (Tachibana et al., 2019). Обнаружено, что атмосферные реки идентифицированы почти для 80 % взрывных циклонов (Eiras-Barca et al., 2018).

Большой вклад в перенос влаги к полюсу вносят экстремальные события меридионального переноса влаги, вызванные разрушением волн Россби, блокирующими системами высокого давления и циклонической деятельностью (Koyama et al., 2017; Liu, Barnes, 2015; Naakka et al., 2019; Papritz, Dunn-Sigouin, 2020; Papritz et al., 2022; Villamil-Otero et al., 2018; Woods et al., 2013). Усреднённый сезонный перенос влаги — результат интегрального вклада отдельных событий, связанных с погодными системами синоптического масштаба, которые влияют на арктический морской лёд и приповерхностные атмосферные условия в синоптических и внутрисезонных временных масштабах (Yang, Magnusdottir, 2017).

На погодные условия и ледовую обстановку в тихоокеанском секторе Арктики (ТСА) влияют южные синоптические процессы, которые являются продолжением процессов, развивающихся над дальневосточными морями (Зимич, 1998). Южные циклоны обладают гораздо большими запасами тепла и влаги, чем арктические, что заметно увеличивает их вклад в транспорт влаги на север. Атмосферное блокирование в ТСА более выражено, чем в атлантическом секторе Арктики; связанная с ним приземная область высокого давления способствует адвекции влаги вплоть до полюса (Woods et al., 2013).

Для оценки транспорта влаги широко применяются реанализы (Dufour et al., 2016; Fearon et al., 2023; Sun et al., 2022; Tachibana et al., 2019; You et al., 2022). Острый недостаток стандартных гидрометеорологических и аэрологических измерений приводит к дефициту ассимилируемых реанализами данных, что может отрицательно сказаться на полученных результатах. Для восполнения пробелов в наблюдениях и верификации результатов моделирования данные реанализов комбинируют со спутниковыми измерениями (Bresson et al., 2022; Groves, Francis, 2002; Kirbus et al., 2023). Однако для количественной оценки транспорта влаги спутниковые микроволновые измерения используются недостаточно.

В настоящей работе представлен анализ события экстремального выноса влаги в ТСА южным циклоном 25–27 ноября 2019 г., которое происходило на фоне положительных аномалий температуры воздуха и поверхности океана (ТПО), обусловленных особенностями атмосферных и океанических процессов в 2019 г. Исследование базировалось на совместном использовании наборов данных реанализа ERA5 (*англ.* European Reanalysis version 5), микроволновых измерений со спутника GCOM-W1 (*англ.* Global Change Observation Mission — Water 1) и ежедневных полей температуры поверхности моря OISST (*англ.* Optimum Interpolation Sea Surface Temperature) с разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$.

Данные и методы

Количественные оценки переноса влаги в ТСА через 67° с.ш. были восстановлены из ежедневных полей интегрального паросодержания атмосферы, влагозапаса облаков, интегрального меридионального потока водяного пара из умеренных широт в северном направлении, а также зональной и меридиональной составляющей скорости приводного ветра на уровне 10 м в узлах регулярной сетки $0,25 \times 0,25^\circ$, полученных из наборов данных реанализа нового поколения ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ECMWF (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) с пространственным разрешением ~ 31 км и почасовым шагом. Основой ERA5 является интегрированная система прогнозирования Cy41r2 с улучшенной ассимиляцией данных наблюдений (Hersbach et al., 2020).

В анализе использовались ежедневные поля интегрального паросодержания атмосферы V (в $\text{кг}/\text{м}^2$), водозапаса облаков Q (в $\text{кг}/\text{м}^2$) и скорости приводного ветра W (в м/с) на высоте 10 м, полученные из измерений микроволнового радиометра AMSR2 (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) со спутника GCOM-W1 японского космического агентства JAXA (*англ.* Japan Aerospace Exploration Agency). Данные версии 8.2 предоставлены RSS (*англ.* Remote Sensing Systems) с пространственным разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$ (<https://data.remss.com/amr2/ocean/L3/v08.2/daily/>).

Для анализа ТПО и её аномалий использовался массив данных OISST 2.1 с пространственным разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$, разработанный NOAA (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration) и доступный с 1981 г. (Huang et al., 2021; Reynolds et al., 2007). В настоящем исследовании были получены среднемесячные аномалии ТПО относительно климатической нормы 1991–2020 гг. для северной части Тихого океана и тихоокеанского сектора Арктики.

Для анализа изменений ледового покрова ТСА использовались ежедневные карты сплошности морского льда, полученные по данным микроволнового радиометра AMSR2 с применением алгоритма ASI (*англ.* ARTIST (Arctic Radiation and Turbulence Interaction Study) Sea Ice) версии 5.4. Данные предоставлены Институтом физики окружающей среды IUP (*нем.* Institut für Umweltphysik) Бременского университета (*нем.* Universität Bremen) (<https://seaice.uni-bremen.de>) в виде полей сплошности льда (в %) в узлах регулярной полярной стереографической сетки NSIDC (*англ.* National Snow and Ice Data Center) с пространственным разрешением $6,25 \times 6,25$ км.

Для синоптического анализа использовались карты: приземного анализа и барической топографии (AT850, AT700, AT500) для северо-западной части Тихого океана Японского метеорологического агентства (ЯМА) (*англ.* Japan Meteorological Agency); геопотенциальных высот изобарической поверхности 500 гПа (AT500) Северного полушария ЯМА; приземного анализа и струйных течений (AT200) Северного полушария NCEI (*англ.* National Centers for Environmental Information) с сайта <https://www.ncei.noaa.gov>, где они находятся в свободном доступе.

Для формирования статистически репрезентативной выборки экстремальных событий переноса влаги в ТСА использованы ежечасные поля вертикально интегрированного меридионального потока водяного пара FIWV (*англ.* Flux Integrated Water Vapor) (в $\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$) через 67° с. ш. из реанализа ERA5, рассчитанные по формуле:

$$\text{FIWV} = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} qv \, dp,$$

где g — ускорение свободного падения ($9,80665 \text{ м/с}^2$), q — удельная влажность (в кг/кг), p_s и p_t — атмосферное давление у поверхности и на верхнем уровне атмосферы (в Па), v — вертикальная составляющая скорости ветра (в м/с), dp — толщина слоя (в Па). Область исследования ограничена долготным (lon) диапазоном 180 – 210° в.д., что обеспечивает детальный анализ переноса влаги в Чукотское море через ключевое поперечное сечение. Экстремальные события идентифицировались на основе суммарного потока влаги $\Phi(t)$ (в $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$) через выбранное поперечное сечение:

$$\Phi(t) = L \sum_{\text{lon}=180^\circ}^{210^\circ} \text{FIWV}(\text{lat} = 67^\circ, \text{lon}, t),$$

где L — длина элемента разрешения на широте $\text{lat} = 67^\circ$ ($10\,862 \text{ м}$).

Пороговое значение определено как 95-й перцентиль Φ за все ноябри 2001–2020 гг. с дополнительным критерием минимальной продолжительности 24 ч, что позволило исключить кратковременные метеорологические флуктуации. Для каждого события рассчитывались характеристики интенсивности — максимальный поток (Φ_{max}) и продолжительность (Δt).

Результаты

Фоновые атмосферные и океанические условия

Экстремальному выносу влаги в ТСА 26–27 ноября 2019 г. в системе южного циклона предшествовали аномально высокие ТПО. Положительная аномалия температуры воздуха совпала с резким переходом Арктической осцилляции (АО) к отрицательной фазе в ноябре

2019 г. (Dethloff et al., 2022) и задержкой осеннего льдообразования, связанной с устойчивым потеплением и положительными аномалиями ТПО в Чукотском море. Основной причиной аномально тёплого ноября стала летняя ТПО в северной части Тихого океана, которая оказалась самой высокой за последние 40 лет (The Arctic..., 2020). Причиной устойчивых положительных аномалий ТПО стали морские волны тепла, получившие название The Blob (Amaya et al., 2020; Chen et al., 2021; Wang W. et al., 2024). В поле усреднённых аномалий атмосферного давления на уровне моря за 2019 г. прослеживался диполь, напоминающий северотихоокеанское колебание. Такие условия выступают основным фактором для возникновения летних морских тепловых волн в регионе (Amaya et al., 2020).

Анализ карт аномалий среднемесячной ТПО за октябрь – ноябрь 2019 г. выявил устойчивые положительные отклонения от климатической нормы 1991–2020 гг. в трёх ключевых районах северной части Тихого океана и ТСА (рис. 1):

- залив Аляска и прилегающая акватория северо-восточной части Тихого океана демонстрировали аномалии ТПО в диапазоне $+2,1...+2,4$ °С в течение всего рассматриваемого периода с максимальными значениями в ноябре ($+2,5...+2,8$ °С);
- восточная часть Берингова моря характеризовалась положительными аномалиями с локальными максимумами до $+2,6...+2,9$ °С с постепенным ослаблением к ноябрю;
- Чукотское море показало наиболее интенсивные аномалии ТПО, достигавшие $+3,2...+3,8$ °С в октябре при практически полном отсутствии ледяного покрова, с последующим снижением до $+1,9...+2,2$ °С в ноябре. При этом продолжительность безлёдного периода в бассейне превысила климатическую норму более чем на месяц, обеспечивая положительную обратную связь «лёд – альbedo». По данным отчёта State of the Climate in 2019 (The Arctic..., 2020), Чукотское море полностью замёрзло 24 декабря, примерно на месяц позже обычного.

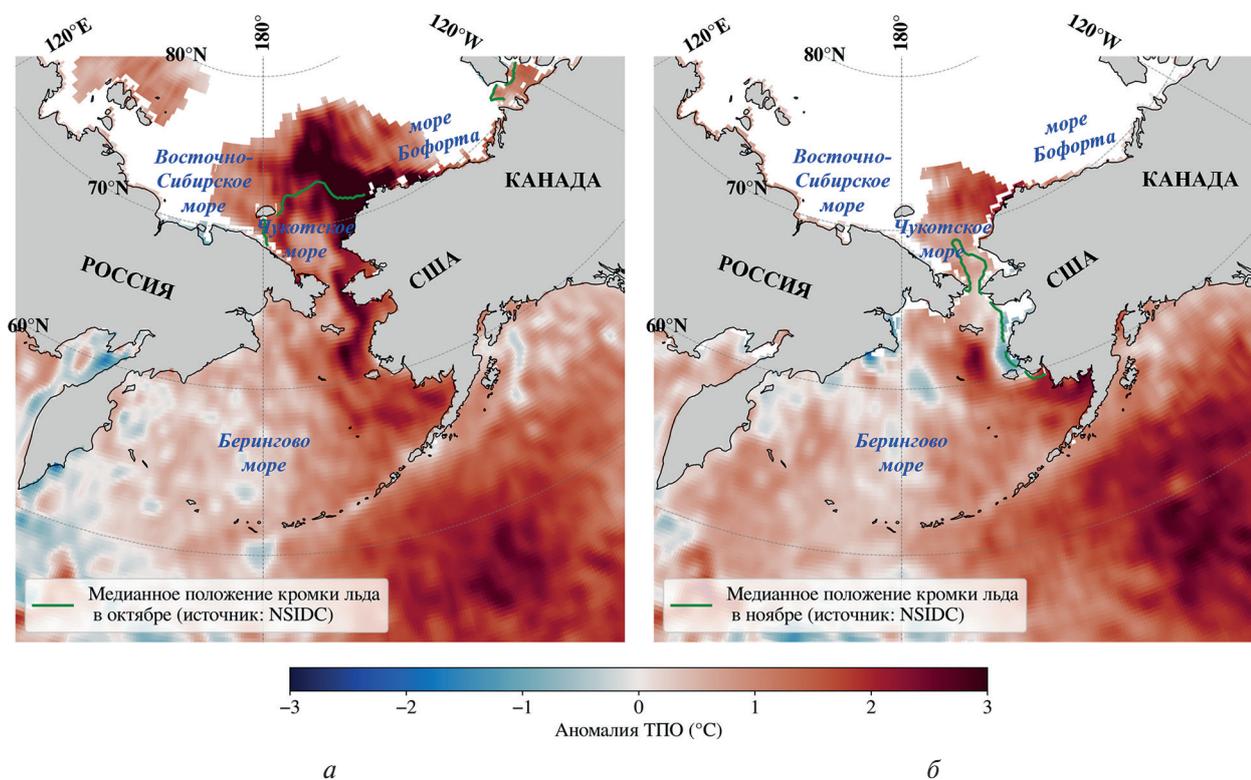


Рис. 1. Аномалия ТПО в северной части Тихого океана и морях тихоокеанского сектора Арктики в октябре (а) и ноябре (б) 2019 г. относительно климатической нормы 1991–2020 гг. Зелёная линия — медианное положение кромки льда за период 1981–2010 гг. для соответствующего месяца (источник: NSIDC)

Пространственно-временная структура наблюдаемых аномалий ТПО соответствует остаточным эффектам морской тепловой волны The Blob 2.0 — крупномасштабной аномалии ТПО в северо-восточной части Тихого океана площадью свыше 2 млн км², которая длилась с мая 2019 г. по декабрь 2020 г., достигла пикового развития летом 2019 г. и продолжала оказывать влияние на термический режим северной части Тихого океана в осенне-зимний период (Amaya et al., 2020; Chen et al., 2021).

Поскольку основное внимание в работе уделено количественной оценке характеристик события переноса водяного пара в ТСА 26–27 ноября 2019 г., важно рассмотреть его в контексте климатической изменчивости экстремальных событий переноса за период 2001–2020 гг. Статистический анализ показал, что за 20 лет было зарегистрировано 11 экстремальных событий переноса водяного пара из умеренных широт в ТСА с продолжительностью от 24 до 97 ч (рис. 2а), причём 8 из них пришлись на 2010–2020 гг. Примечательно, что 2020 г. стал единственным за 20 лет, когда было зарегистрировано 2 экстремальных события. Наблюдаемое неравномерное распределение экстремальных событий отражает статистически значимое проявление нелинейной динамики климатической системы Арктики. Усиление нисходящего длинноволнового излучения, вызванное переносом влаги, приводит к ускоренному таянию арктического морского льда, создавая условия для дальнейшей интенсификации экстремальных событий (Lubin et al., 2025; Wang Z. et al., 2024), в том числе в период его становления.

Южный циклон, который оказывал влияние на Чукотское море 25–30 ноября 2019 г., обеспечивал экстремальный перенос влаги в ТСА на протяжении 30 ч с выраженным пиком суммарного потока в 12:00 GMT (англ. Greenwich Mean Time) 26 ноября (см. рис. 2б). Выбранное нами событие по своей продолжительности и интенсивности относится к типичным примерам таких экстремальных явлений, связанных с погодными системами синоптического масштаба (см. рис. 2а).

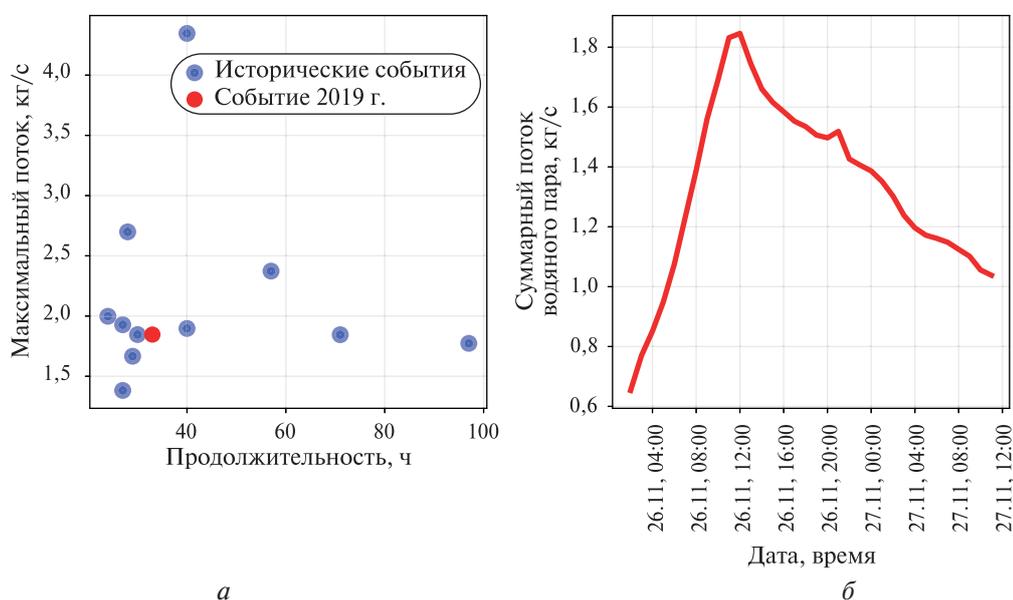


Рис. 2. Экстремальные события переноса влаги в ТСА в ноябре 2001–2020 гг.: а — диаграмма рассеяния, показывающая соотношение между продолжительностью (в ч) и максимальным суммарным потоком ($\times 10^8$ кг/с) для всех экстремальных событий; б — временной ход суммарного потока водяного пара ($\times 10^8$ кг/с) во время события 26–27 ноября 2019 г.

Синоптическая ситуация

Циклон образовался в 00:00 GMT 24 ноября на волне полярного фронта над Японским морем вблизи южного побережья Приморского края. Его траекторию определял блокирующий высотный гребень над заливом Аляска (рис. 3а, см. с. 338). Циклон перемещался на северо-

восток под передней частью высотной ложбины, скорость его перемещения возрастала от 35 до 85 км/ч (карты приземного анализа ЯМА). Интенсивное углубление (на 20 гПа за первые сутки существования и на 36 гПа — за вторые) даёт основание классифицировать его как взрывной. На взрывное развитие циклона оказала влияние атмосферная река (Eiras-Barca et al., 2018), которая прослеживалась в полях паросодержания атмосферы по данным AMSR2 за 24–27 ноября и 26 ноября достигла 65° с. ш. (см. врезку на *рис. 5а*), а также сопутствующее ей струйное течение (карта AT200, сайт <https://www.ncei.noaa.gov>, не представлена) (Tachibana et al., 2019).

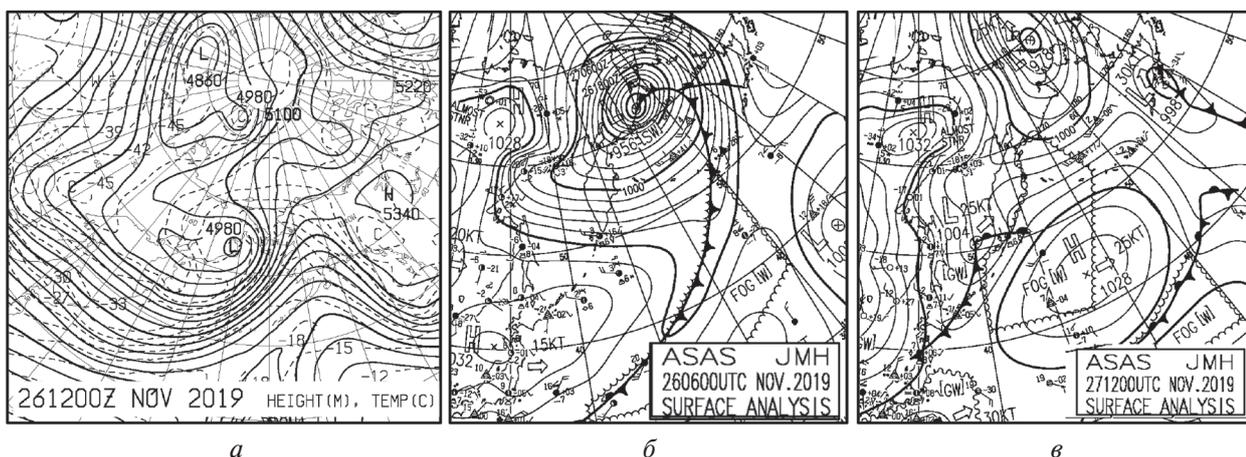


Рис. 3. Карты ЯМА AT500 северного полушария в 12:00 GMT 26 ноября (*а*); приземного анализа в 06:00 GMT 26 ноября (*б*) и в 12:00 GMT 27 ноября (*в*) 2019 г.

В 00:00 GMT 25 ноября циклон вышел центром к южному побережью Камчатки и влился в обширную циклоническую систему, которая распространялась на Охотское море и западную половину Берингова. Структура термобарического поля тропосферы (см. *рис. 3а*) указывает на выраженную меридиональность синоптического процесса, которая обеспечивала вынос тёплой и влажной морской воздушной массы из умеренных широт в ТСА. Интенсивная адвекция тепла в передней части циклона способствовала ещё большему росту высотного гребня, что, в свою очередь, усиливало атмосферное блокирование и северную составляющую его траектории при снижении скорости перемещения.

В 06:00 GMT 26 ноября циклон достиг стадии максимального развития с давлением в центре 956 гПа над северо-западным побережьем Берингова моря (см. *рис. 3б*). В 12:00 GMT 27 ноября он вышел центром на Чукотское море (см. *рис. 3в*) и в дальнейшем заполнялся над Северным Ледовитым океаном. Адвекция тепла и влаги по восточной и северо-восточной периферии циклона достигла максимума 26–27 ноября и начала ослабевать по мере перемещения высотного гребня на восток.

Интегрированный перенос водяного пара на акваторию Чукотского моря

Вклад погодных систем синоптического масштаба в перенос водяного пара в Арктику из умеренных широт иллюстрирует *рис. 4* (см. с. 339). На временной диаграмме вертикально интегрированного меридионального потока водяного пара (см. *рис. 4а*) ярко выражены два значимых события. Более продолжительное связано с синоптическим процессом 24–30 ноября 2019 г. Количественная оценка переноса водяного пара в ТСА через 67° с. ш. в секторе 180–210° в. д. выявила совпадение его высокой временной концентрации с выносом тепла и влаги в передней части южного взрывного циклона на Чукотское море 26–27 ноября.

Продолжительность суммарного потока влаги, удовлетворяющего пороговому критерию (95-й перцентиль), составила 30 ч, в течение которых был обеспечен чистый перенос 15,1 Тг

водяного пара, что соответствует 30,1 % от общего месячного переноса. Максимум пришелся на 26 ноября (см. рис. 4а). При временной доле всего 4,2 % от месячного периода коэффициент эффективности, равный отношению вклада в перенос к временной доле, достиг значения 7,2, что указывает на высокую интенсивность процесса.

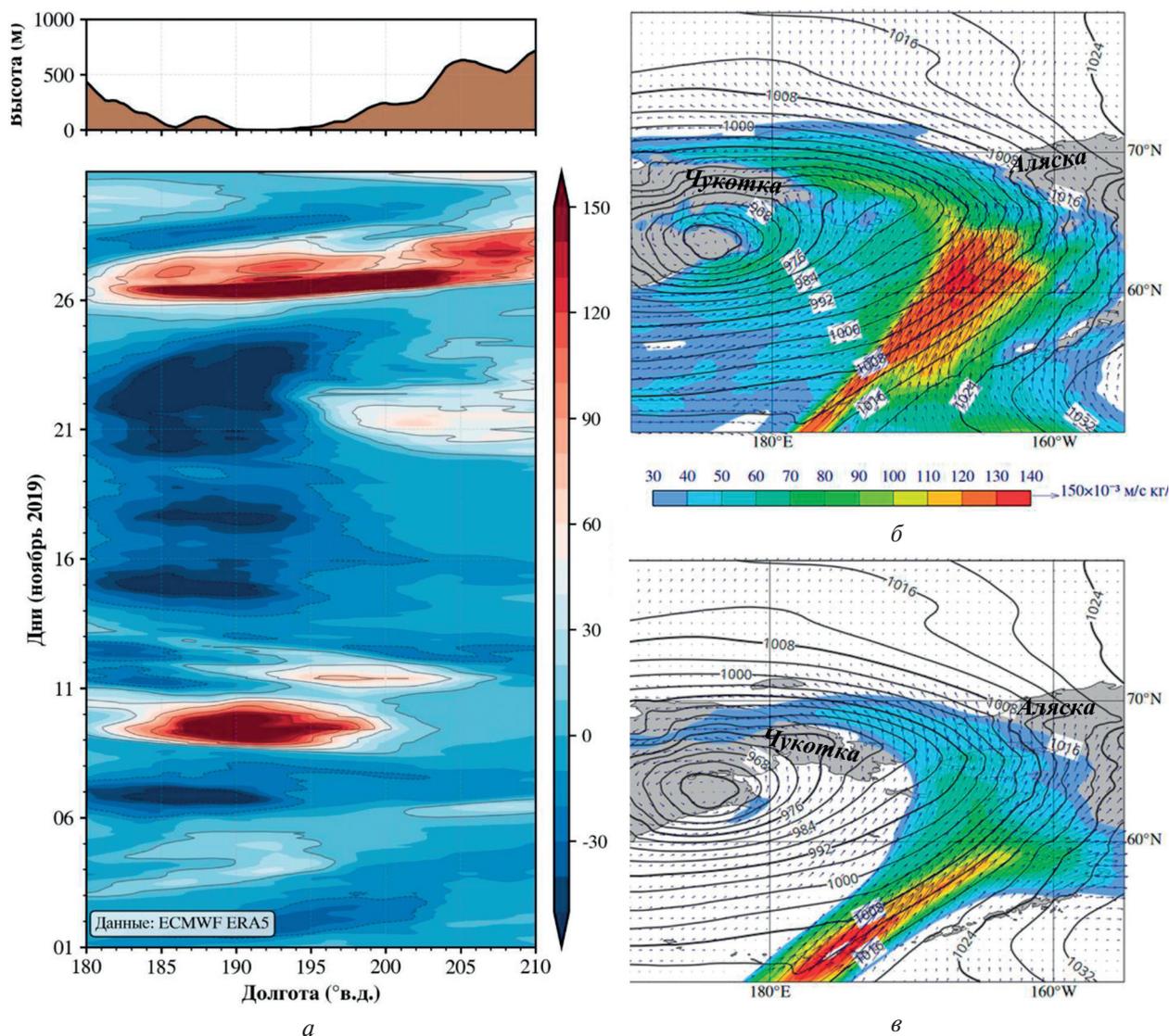


Рис. 4. Перенос водяного пара в атмосфере над северной частью Тихого океана и ТСА в ноябре 2019 г.: а — временная диаграмма вертикально интегрированного меридионального потока водяного пара FIWV (шкала в $\text{кг}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$) через 67° с.ш. в секторе $180\text{--}210^\circ$ в.д., верхняя панель показывает профиль рельефа местности (в м) вдоль параллели; б, в — горизонтальное распределение потоков влаги ($\times 10^{-3}$ (м/с)·(кг/кг)) на изобарических уровнях 925 гПа (б) и 700 гПа (в) 26 ноября 2019 г., 12:00 GMT. Изобары показывают атмосферное давление на уровне моря (в гПа, интервал 4 гПа), стрелки — векторы потока влаги

Дополнительно отметим менее продолжительное событие с относительно высокой интенсивностью переноса влаги 9–10 ноября (см. рис. 4а). Водяной пар выносился в течение суток по северо-восточной периферии циклона с центром южнее Алеутских островов (карты приземного анализа NCEP (англ. National Centers for Environmental Prediction), не показаны). Адвекцию тепла и влаги в направлении севера поддерживало положение блокирующего высотного гребня над Аляской. Локализация циклона стала причиной меньшей широтной протяжённости области значимого переноса водяного пара.

При пороговом значении $\Phi(t) \geq 150 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ это событие обеспечило 17,4 % месячного переноса влаги при временной доле 3,5 %, что соответствует коэффициенту эффективности 5. Суммарный же эффект обоих событий обеспечил 47,5 % общего месячного переноса влаги на Чукотское море через рассматриваемое сечение. Таким образом, две погодные системы синоптического масштаба обеспечили практически половину месячного переноса влаги из умеренных широт в ТСА.

Горизонтальные потоки влаги на уровне изобарических поверхностей 925 Па (см. рис. 4б) и 700 гПа (см. рис. 4в) показывают уменьшение концентрации водяного пара с высотой. Основная его масса переносилась в ТСА в пограничном слое атмосферы (см. рис. 4б). Согласно вектору переноса, его направление соответствовало циклонической циркуляции.

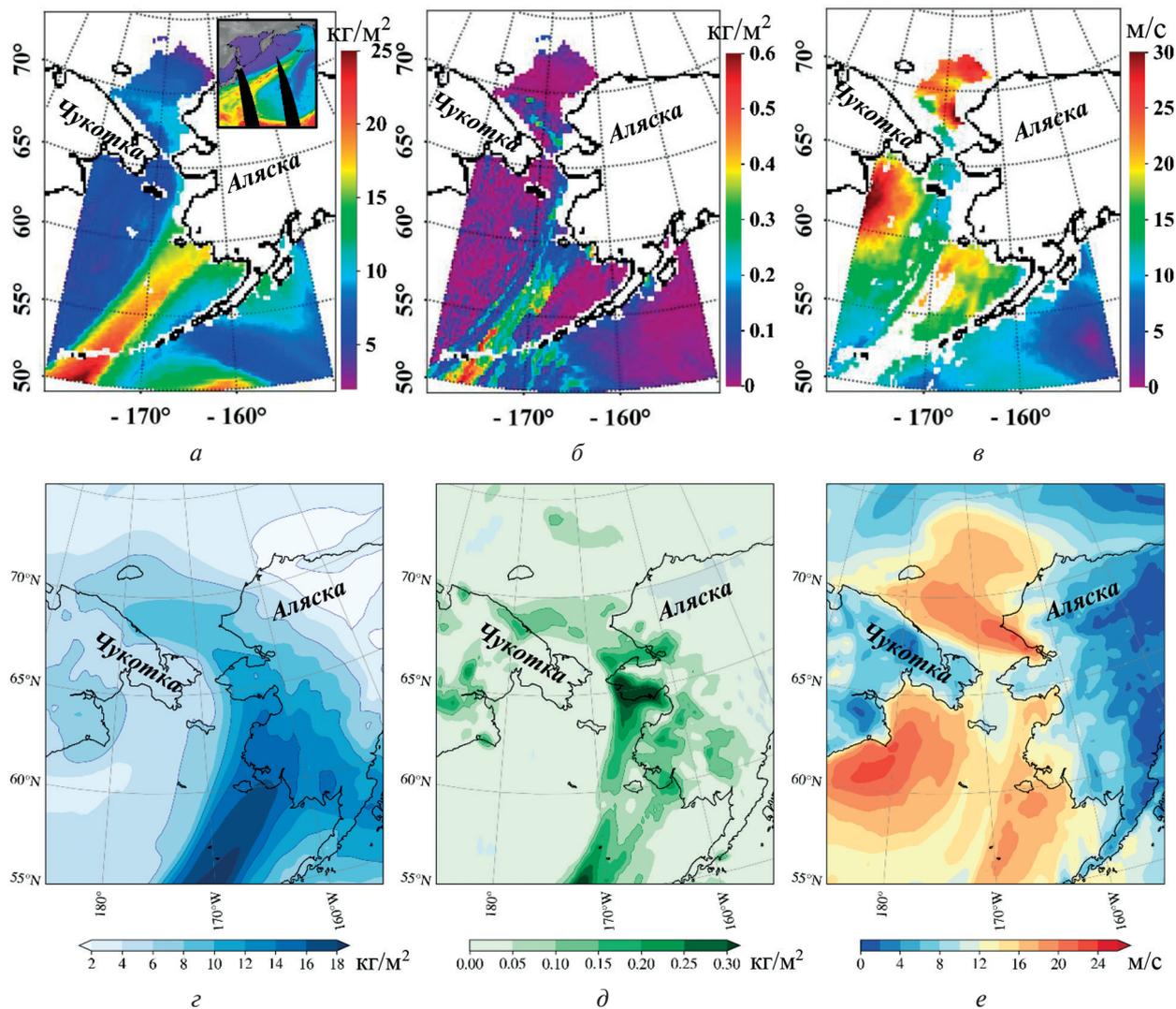


Рис. 5. Поля паросодержания атмосферы (а, г), водозапаса облаков (б, д) и скорости приводного ветра (в, е) в 14:30 GMT по данным микроволнового радиометра AMSR2 (спутник GCOM-W1) (а–в) и в 14:00 GMT по данным реанализа ERA5 (г–е) 26 ноября 2019 г. Врезка на (а) — атмосферная река в поле водяного пара (сайт <https://images.remss.com>)

Интегральное паросодержание атмосферы V над Чукотским морем по данным радиометра AMSR2 в 14:30 GMT 26 ноября составляло 9–12 $\text{кг}/\text{м}^2$ (рис. 5а), что является значительной величиной для этого региона осенью. Водозапас облаков $Q = 0,2 \dots 0,3 \text{ кг}/\text{м}^2$ в зоне фронта окклюзии указывает на большую вероятность жидких осадков. Юго-восточный ветер со скоростью $W = 26 \dots 28 \text{ м}/\text{с}$ (см. рис. 5в) поддерживал положительные ТПО в Чукотском море на

фоне задержки льдообразования в ноябре. Данные ERA5 демонстрируют хорошее соответствие полей водяного пара V (см. рис. 5г), но недооценку реанализом капельной влаги Q (см. рис. 5д) и скорости приводного ветра W (см. рис. 5е).

Ледовая обстановка

В ноябре практически вся акватория Чукотского моря была свободна ото льда, за исключением узкой зоны вдоль побережья Чукотки и восточной части залива Коцебу (карта протяжённости ледового покрова, сайт <https://noaadata.apps.nsidc.org/>). Сравнительный анализ ледовой обстановки в течение двух суток до (рис. 6а) и после (см. рис. 6б) выхода циклона на Чукотское море показал сокращение ледяного покрова и уменьшение сплочённости льда более чем на 50 % (см. рис. 6в) в его северной части, включая отдельные районы прилегающей полярной шапки севернее 76° с. ш.

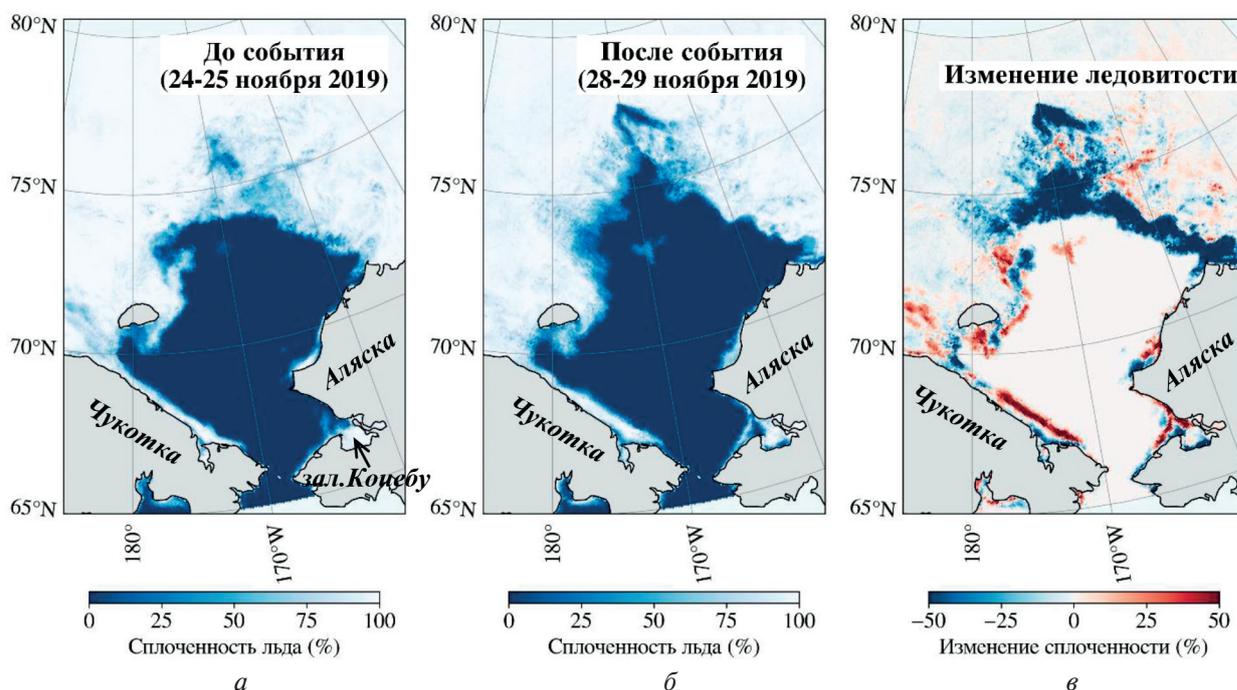


Рис. 6. Карты сплочённости льда: а — до выхода циклона на Чукотское море; б — после выхода циклона на Чукотское море; в — карта изменения ледовитости Чукотского моря и прилегающей акватории Северного Ледовитого океана (источник: <https://data.seaice.uni-bremen.de/amsr2/>)

Сокращение ледяного покрова в северной части обеспечивалось комплексным воздействием динамических, тепловых и радиационных факторов. Юго-восточные и восточные ветры со скоростью более 25 м/с и штормовое волнение в северо-восточном секторе циклона способствовали механическому разрушению тонкого молодого льда (см. рис. 6в), где его сплочённость до выхода циклона составляла менее 75 % (см. рис. 6а). При этом синоптический процесс осуществил перенос 15,1 Тг водяного пара за 30 ч, что значительно увеличило содержание влаги в атмосфере, усилив вклад нисходящего длинноволнового излучения в поверхностный тепловой баланс.

Особенно важным представляется совместный эффект предварительных океанических условий и атмосферного воздействия на ледовитость рассматриваемого бассейна. Адвекция тепла и влаги в системе южного циклона происходила на фоне положительных аномалий ТПО, связанных, вероятно, с остаточными эффектами морской волны тепла The Blob 2.0 (Зуенко и др., 2025; Amaya et al., 2020), что также усиливало тепловое воздействие на поверхность Чукотского моря.

Несмотря на адвекцию холода в тылу циклона, ледяной покров в северной части Чукотского моря восстановился полностью к 5 декабря (карты протяжённости ледового покрова, сайт <https://noaadata.apps.nsidc.org/>). Согласно систематическому анализу, в осенние месяцы циклоны обычно способствуют становлению льда в Чукотском море (Cavallo et al., 2025; Schreiber, Serreze, 2020). Однако в рассматриваемом случае наблюдался противоположный эффект, что показывает необходимость более глубокого понимания вклада арктических циклонов в изменчивость ледовой обстановки и влияния процессов синоптического масштаба на климатические тренды.

Выводы

В настоящей работе исследовано событие переноса вертикально интегрированного меридионального потока водяного пара из умеренных широт в ТСА южным циклоном 26–27 ноября 2019 г. через 67° с.ш. в секторе $180\text{--}210^\circ$ в.д., классифицированное как экстремальное по пороговому критерию (95-й перцентиль) продолжительности суммарного потока влаги, которая составила 30 ч и обеспечила 30,1 % от общего месячного переноса. Выбранное событие по своей продолжительности и интенсивности относится к характерным для этого региона экстремальным явлениям переноса водяного пара, связанным с погодными системами синоптического масштаба.

Перенос водяного пара в ТСА 26–27 ноября 2019 г. был рассмотрен в контексте климатической изменчивости экстремальных событий за период 2001–2020 гг. За 20 лет зарегистрировано 11 экстремальных событий переноса в Чукотское море, причём 8 из них (72,7 %) пришлись на последнее десятилетие (2010–2020), а 2020 г. стал единственным годом с 2 экстремальными событиями в период становления льда. Выявленная нелинейная тенденция экстремальных событий может свидетельствовать о возможном ускорении климатических изменений влагопереноса в ТСА. Эта закономерность соответствует установленным изменениям в повторяемости более продолжительных арктических циклонов в осенне-зимний период (Qin et al., 2025).

Экстремальный перенос водяного пара в ТСА происходил на фоне устойчивых положительных отклонений ТПО от климатической нормы 1991–2020 гг. в северной части Тихого океана. В Чукотском море аномалии ТПО в ноябре достигали от $+1,9$ до $+2,2^\circ\text{C}$, а продолжительность безлёдного периода была превышена более чем на месяц. Предположительно, причиной этих отклонений стали остаточные эффекты морской волны тепла, впоследствии получившей название The Blob 2.0 (Amaya et al., 2020). Выявленная устойчивость крупномасштабных аномалий ТПО в северо-восточной части Тихого океана (Belkin, Short, 2023) в сочетании с их систематической адвекцией течениями через проливы Алеутских островов в Берингово море и далее к Берингову проливу (Carvalho et al., 2021) делает Чукотское море особенно восприимчивым к таким аномалиям.

Разрушение морского льда осуществлялось воздействием комбинации динамических факторов (ветры >25 м/с, штормовое волнение), тепловых процессов (адвекция тепла) и радиационных эффектов (предполагаемое усиление нисходящего длинноволнового излучения вследствие увеличения влагосодержания атмосферы). При этом данные ERA5 демонстрировали заметное занижение скорости ветра по сравнению со спутниковыми измерениями AMSR2, что может приводить к недооценке интенсивности теплообмена между океаном и атмосферой и, как следствие, теплового баланса поверхности океана. Наряду с этим обнаружены значительные неопределённости в воспроизведении потоков тепла в Арктике различными системами реанализа (Kong et al., 2022; Uhlíková et al., 2024), что подчёркивает необходимость развития методов прямой спутниковой оценки переноса влаги и его климатических эффектов. Перспективы применения спутниковых методов для изучения экстремальных событий переноса влаги в Арктику включают: использование микроволновых радиометрических измерений AMSR2, SSMIS (*англ.* Special Sensor Microwave Imager Sounder) и других миссий; совершенствование методов комплексного анализа взаимодействия экстремальных

явлений меридионального переноса водяного пара с термическими условиями подстилающей поверхности и динамикой морского льда в Арктике в условиях изменяющегося климата.

Современные исследования подтверждают, что такие события могут оказывать каскадные эффекты на арктическую климатическую систему, влияя не только на местные гидрологические процессы, но и на состояние морского льда и региональный тепловой баланс (Ma et al., 2024; Wang W. et al., 2024; Ye et al., 2025).

Литература

1. Алексеев Г. В., Кузмина С. И., Уразильдеева А. В., Бобылев Л. П. Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на потепление в Арктике в зимний период // *Фундам. и приклад. климатология*. 2016. № 1. С. 43–63. DOI: 10.21513/2410-8758-2016-1-43-63.
2. Зимич П. И. Атмосферные процессы и погода Восточной Арктики. Владивосток: Дальнаука, 1998. 236 с.
3. Зуенко Ю. И., Савин А. Б., Басюк Е. О. Последствия экстремального потепления 2016–2019 гг. для запаса тихоокеанской трески *Gadus macrocephalus* (Gadidae) в российских водах северо-западной части Берингова моря // *Изв. ТИНРО*. 2025. Т. 205. № 2. С. 366–388. DOI: 10.26428/1606-9919-2025-205-366-388.
4. Amaya D. J., Miller A. J., Xie S.-P., Kosaka Y. Physical drivers of the summer 2019 North Pacific marine heatwave // *Nature Communications*. 2020. V. 11. No. 1. Article 1903. DOI: 10.1038/s41467-020-15820-w.
5. Belkin I. M., Short J. W. Echoes of the 2013–2015 marine heat wave in the eastern Bering Sea and consequent biological responses // *J. Marine Science and Engineering*. 2023. V. 11. No. 5. Article 958. <https://doi.org/10.3390/jmse11050958>.
6. Bresson H., Rinke A., Mech M. et al. Case study of a moisture intrusion over the Arctic with the ICOSahedral Non-hydrostatic (ICON) model: resolution dependence of its representation // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022. V. 22. P. 173–196. <https://doi.org/10.5194/acp-22-173-2022>.
7. Brunello C. F., Gebhardt F., Rinke A. et al. Moisture transformation in warm air intrusions into the Arctic: Process attribution with stable water isotopes // *Geophysical Research Letters*. 2024. V. 51. Iss. 21. Article e2024GL111013. DOI: 10.1029/2024GL111013.
8. Carvalho K. S., Smith T. E., Wang S. Bering Sea marine heatwaves: Patterns, trends and connections with the Arctic // *J. Hydrology*. 2021. V. 600. Article 126462. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2021.126462.
9. Cavallo S. M., Frank M. C., Bitz C. M. Sea ice loss in association with Arctic cyclones // *Communications Earth and Environment*. 2025. V. 6. Article 44. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02022-9>.
10. Chen Z., Shi J., Liu Q. et al. A persistent and intense marine heatwave in the Northeast Pacific during 2019–2020 // *Geophysical Research Letters*. 2021. V. 48. Iss. 13. Article e2021GL093239. <https://doi.org/10.1029/2021GL093239>.
11. Dethloff K., Maslowski W., Hendricks S. et al. Arctic sea ice anomalies during the MOSAiC winter 2019/20 // *The Cryosphere*. 2022. V. 16. No. 3. P. 981–1005. <https://doi.org/10.5194/tc-16-981-2022>.
12. Dufour A., Zolina O., Gulev S. K. Atmospheric moisture transport to the Arctic: Assessment of reanalyses and analysis of transport components // *J. Climate*. 2016. V. 29. No. 14. P. 5061–5081. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0559.1.
13. Eiras-Barca J., Ramos A. M., Pinto J. G. et al. The concurrence of atmospheric rivers and explosive cyclogenesis in the North Atlantic and North Pacific basins // *Earth System Dynamics*. 2018. V. 9. No. 1. P. 91–102. DOI: 10.5194/esd-9-91-2018.
14. Fearon M. G., Doyle J. D., Finocchio P. M. Soil moisture influences on summer Arctic cyclones and their associated poleward moisture transport // *Monthly Weather Review*. 2023. V. 151. No. 7. P. 1699–1716. DOI: 10.1175/MWR-D-22-0264.1.
15. Gimeno-Sotelo L., Nieto R., Vázquez M., Gimeno L. A new pattern of the moisture transport for precipitation related to the drastic decline in Arctic sea ice extent // *Earth System Dynamics*. 2018. V. 9. No. 2. P. 611–625. DOI: 10.5194/esd-9-611-2018.
16. Groves D. G., Francis J. A. Moisture budget of the Arctic atmosphere from TOVS satellite data // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2002. V. 107. No. D19. Article 4391. DOI: 10.1029/2001JD001191.
17. Hao M., Luo Y., Lin Y. et al. Contribution of atmospheric moisture transport to winter Arctic warming // *Intern. J. Climatology*. 2019. V. 39. No. 5. P. 2697–2710. DOI: 10.1002/joc.5982.
18. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis // *Quarterly J. Royal Meteorological Soc.* 2020. V. 146. No. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.

19. Huang B., Chunying L., Banzon V. Improvements of the Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST) version 2.1 // *J. Climate*. 2021. V. 34. No. 8. P. 2923–2939. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0166.1.
20. Kirbus B., Tiedeck S., Camplani A. et al. Surface impacts and associated mechanisms of a moisture intrusion into the Arctic observed in mid-April 2020 during MOSAiC // *Frontiers in Earth Science*. 2023. V. 11. Article 1147848. DOI: 10.3389/feart.2023.1147848.
21. Kong B., Liu N., Fan L. et al. Evaluation of surface meteorology parameters and heat fluxes from CFSR and ERA5 over the Pacific Arctic Region // *Quarterly J. Royal Meteorological Soc.* 2022. V. 148. No. 747. P. 2973–2990. <https://doi.org/10.1002/qj.4346>.
22. Koyama T., Stroeve J., Cassano J., Crawford A. Sea ice loss and Arctic cyclone activity from 1979 to 2014 // *J. Climate*. 2017. V. 30. No. 12. P. 4735–4754. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0542.1.
23. Liu C., Barnes E.A. Extreme moisture transport into the Arctic linked to Rossby wave breaking // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2015. V. 120. No. 9. P. 3774–3788. DOI: 10.1002/2014JD022796.
24. Lubin D., Zou X., Mülmenstädt J. et al. Surface radiation trends at north slope of Alaska Influenced by large-scale circulation and atmospheric rivers // *EGUsphere [preprint]*. 2025. 24 p. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-2768>.
25. Ma W., Wang H., Chen G. et al. Wintertime extreme warming events in the high Arctic: characteristics, drivers, trends, and the role of atmospheric rivers // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2024. V. 24. No. 7. P. 4451–4472. <https://doi.org/10.5194/acp-24-4451-2024>.
26. Naakka T., Nygård T., Vihma T. et al. Atmospheric moisture transport between mid-latitudes and the Arctic: Regional, seasonal and vertical distributions // *Intern. J. Climatology*. 2019. V. 39. No. 6. P. 2862–2879. DOI: 10.1002/joc.5988.
27. Newman M., Kiladis G.N., Weickmann K.M. et al. Relative contributions of synoptic and low-frequency eddies to time-mean atmospheric moisture transport, including the role of atmospheric rivers // *J. Climate*. 2012. V. 25. No. 21. P. 7341–7361. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00665.1.
28. Papritz L., Dunn-Sigouin E. What configuration of the atmospheric circulation drives extreme net and total moisture transport into the Arctic // *Geophysical Research Letters*. 2020. V. 47. No. 17. Article e2020GL089769. DOI: 10.1029/2020GL089769.
29. Papritz L., Hauswirth D., Hartmuth K. Moisture origin, transport pathways, and driving processes of intense wintertime moisture transport into the Arctic // *Weather and Climate Dynamics*. 2022. V. 3. No. 1. P. 1–20. DOI: 10.5194/wcd-3-1-2022.
30. Park H.-S., Lee S., Son S.-W. et al. The impact of poleward moisture and sensible heat flux on Arctic winter sea ice variability // *J. Climate*. 2015. V. 28. No. 13. P. 5030–5040. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0074.1.
31. Qin T., Ren H.-L., Zhao S. et al. Climatic characteristics and interannual influencing factors of extreme cyclones in the arctic cold season // *Climate Dynamics*. 2025. V. 63. No. 7. Article 283. 14 p. DOI: 10.1007/s00382-025-07762-0.
32. Reynolds R. W., Smith T. M., Liu C. et al. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature // *J. Climate*. 2007. V. 20. No. 22. P. 5473–5496. DOI: 10.1175/2007JCLI1824.1.
33. Schreiber E.A.P., Serreze M.C. Impacts of synoptic-scale cyclones on Arctic sea-ice concentration: a systematic analysis // *Annals of Glaciology*. 2020. V. 61. Iss. 82. P. 139–153. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.23>.
34. Sun W., Liang Y., Bi H. et al. Insight on poleward moisture and energy transport into the Arctic from ERA5 // *Atmosphere*. 2022. V. 13. No. 4. Article 616. DOI: 10.3390/atmos13040616.
35. Tachibana Y., Komatsu K.K., Alexeev V.A. et al. Warm hole in Pacific Arctic sea ice cover forced mid-latitude Northern Hemisphere cooling during winter 2017–18 // *Scientific Reports*. 2019. V. 9. No. 1. Article 5567. 12 p. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41682-4>.
36. The Arctic: State of the Climate in 2019 // *Bull. American Meteorological Soc.* 2020. V. 101. No. 8. P. S239–S286. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0086.1>.
37. Uhlíková T., Vihma T., Karpechko A. Yu., Uotila P. Effects of Arctic sea-ice concentration on turbulent surface fluxes in four atmospheric reanalyses // *The Cryosphere*. 2024. V. 18. No. 2. P. 957–976. <https://doi.org/10.5194/tc-18-957-2024>.
38. Vihma T., Screen J., Tjernström M. et al. The atmospheric role in the Arctic water cycle: A review on processes, past and future changes, and their impacts // *J. Geophysical Research: Biogeosciences*. 2015. V. 121. P. 586–620. DOI: 10.1002/2015JG003132.
39. Villamil-Otero G.A., Zhang J., He J., Zhang X. Role of extratropical cyclones in the recently observed increase in poleward moisture transport into the Arctic Ocean // *Advances in Atmospheric Sciences*. 2018. V. 35. P. 85–94. DOI: 10.1007/s00376-017-7116-0.
40. Walsh J.E. Intensified warming of the Arctic: Causes and impacts on middle latitudes // *Global and Planetary Change*. 2014. V. 117. P. 52–63. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2014.03.003.

41. Wang W., Wang Y., Zhang J. *et al.* Assessment of the impact of Pacific inflow on sea surface temperature prior to the freeze-up period over the Bering Sea // *Remote Sensing*. 2024. V. 16. No. 1. Article 113. <https://doi.org/10.3390/rs16010113>.
42. Wang Z., Ding Q., Wu R. *et al.* Role of atmospheric rivers in shaping long term Arctic moisture variability // *Nature Communications*. 2024. V. 15. Article 5505. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49857-y>.
43. White D., Hinzman L., Alessaet L. *et al.* The Arctic freshwater system: Changes and impacts // *J. Geophysical Research: Biogeosciences*. 2007. V. 112. Article G04S54. DOI: 10.1029/2006JG000353.
44. Woods C., Caballero R. The role of moist intrusions in winter Arctic warming and sea ice decline // *J. Climate*. 2016. V. 29. No. 12. P. 4473–4485. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0773.1.
45. Woods C., Caballero R., Svensson G. Large-scale circulation associated with moisture intrusions into the Arctic during winter // *Geophysical Research Letters*. 2013. V. 40. No. 17. P. 4717–4721. DOI: 10.1002/grl.50912.
46. Yang W., Magnusdottir G. Springtime extreme moisture transport into the Arctic and its impact on sea ice concentration // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2017. V. 122. No. 10. P. 5316–5329. DOI: 10.1002/2016JD026324.
47. Ye K., Cohen J., Chen H. W. *et al.* Attributing climate and weather extremes to Northern Hemisphere sea ice and terrestrial snow: Progress, challenges and ways forward // *npj Climate and Atmospheric Science*. 2025. V. 8. No. 1. Article 166. <https://doi.org/10.1038/s41612-025-01012-0>.
48. You C., Tjernström M., Devasthale A. Warm and moist air intrusions into the winter Arctic: a Lagrangian view on the near-surface energy budgets // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022. V. 22. No. 12. P. 8037–8057. DOI: 10.5194/acp-22-8037-2022.

Extreme moisture transport to the Pacific Arctic on November 26–27, 2019, from ERA5 reanalysis dataset and microwave satellite measurements

I. A. Gurvich, M. K. Pichugin, A. V. Baranyuk

V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia
E-mails: gurvich@poi.dvo.ru, pichugin@poi.dvo.ru, baranyuk.av@poi.dvo.ru

The paper examines the influence of the southern synoptic process on the extreme water vapor transport to the Pacific Arctic and ice conditions of the Chukchi Sea using the ERA5 high-resolution reanalysis dataset, microwave satellite measurements and the OISST (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature) dataset version 2.1. On the basis of the threshold criterion, the event was classified as extreme with duration of 30 hours and contribution of 30.1 % to the total monthly moisture transport in November 2019 through 67° N in the 180–210° E sector. Statistical analysis for 2001–2020 revealed 11 such extreme events of water vapor transfer to the Chukchi Sea, with 72.7 % of them occurring in the past decade, which may indicate an acceleration of climatic changes in moisture transport to the Arctic. The event occurred against the background of stable positive sea surface temperature anomalies in the North Pacific and excess in the duration of ice-free period in the Chukchi Sea by more than a month, which is associated with the residual effects of the marine heat wave. A significant sea ice reduction in the northern part of the Chukchi Sea was accompanied by a combination of dynamic factors (winds >25 m/s, storm waves), thermal processes (heat advection) and radiation effects (an expected increase in descending long-wave radiation due to an increase in atmospheric moisture content). At the same time, the revealed underestimation of wind speed by ERA5 data compared with satellite measurements may lead to an underestimation of the intensity of ocean–atmosphere heat exchange. The study shows that such events can have cascading effects on the Pacific Arctic climate system, affecting hydrological processes, sea ice conditions and regional thermal balance.

Keywords: Arctic, Chukchi Sea, moisture transport, southern cyclone, sea heat wave, ice conditions, climate change, microwave satellite measurements, reanalysis

Accepted: 01.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-333-348

References

1. Alekseev G. V., Kuzmina S. I., Urazgildeeva A. V., Bobylev L. P., Impact of atmospheric heat and moisture transport on Arctic warming in winter, *Fundamental and Applied Climatology*, 2016, No. 1, pp. 43–63 (in Russian), DOI: 10.21513/2410-8758-2016-1-43-63.
2. Zimich P. I., *Atmosfernye protsessy i pogoda Vostochnoi Arktiki* (Atmospheric processes and weather in the Eastern Arctic), Vladivostok: Dal'nauka, 1998, 236 p. (in Russian).
3. Zuenko Yu. I., Savin A. B., Basyuk E. O., Impacts of extreme warming in 2016–2019 on the stock of pacific cod *Gadus macrocephalus* (Gadidae) in the Russian waters of northwestern Bering Sea, *Izvestiya TINRO*, 2025, V. 205, No. 2, pp. 366–388 (in Russian), DOI: 10.26428/1606-9919-2025-205-366-388.
4. Amaya D. J., Miller A. J., Xie S. P., Kosaka Y., Physical drivers of the summer 2019 North Pacific marine heatwave, *Nature Communications*, 2020, V. 11, No. 1, Article 1903, DOI: 10.1038/s41467-020-15820-w.
5. Belkin I. M., Short J. W., Echoes of the 2013–2015 marine heat wave in the eastern Bering Sea and consequent biological responses, *J. Marine Science and Engineering*, 2023, V. 11, No. 5, Article 958, <https://doi.org/10.3390/jmse11050958>.
6. Bresson H., Rinke A., Mech M. et al., Case study of a moisture intrusion over the Arctic with the ICOsahedral Non-hydrostatic (ICON) model: resolution dependence of its representation, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, V. 22, pp. 173–196, <https://doi.org/10.5194/acp-22-173-2022>.
7. Brunello C. F., Gebhardt F., Rinke A. et al., Moisture transformation in warm air intrusions into the Arctic: Process attribution with stable water isotopes, *Geophysical Research Letters*, 2024, V. 51, Iss. 21, Article e2024GL111013, DOI: 10.1029/2024GL111013.
8. Carvalho K. S., Smith T. E., Wang S., Bering Sea marine heatwaves: Patterns, trends and connections with the Arctic, *J. Hydrology*, 2021, V. 600, Article 126462, DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2021.126462.
9. Cavallo S. M., Frank M. C., Bitz C. M., Sea ice loss in association with Arctic cyclones, *Communications Earth and Environment*, 2025, V. 6, Article 44, <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02022-9>.
10. Chen Z., Shi J., Liu Q. et al., A persistent and intense marine heatwave in the Northeast Pacific during 2019–2020, *Geophysical Research Letters*, 2021, V. 48, Iss. 13, Article e2021GL093239, <https://doi.org/10.1029/2021GL093239>.
11. Dethloff K., Maslowski W., Hendricks S. et al., Arctic sea ice anomalies during the MOSAiC winter 2019/20, *The Cryosphere*, 2022, V. 16, No. 3, pp. 981–1005, <https://doi.org/10.5194/tc-16-981-2022>.
12. Dufour A., Zolina O., Gulev S. K., Atmospheric moisture transport to the Arctic: Assessment of reanalyses and analysis of transport components, *J. Climate*, 2016, V. 29, No. 14, pp. 5061–5081, DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0559.1.
13. Eiras-Barca J., Ramos A. M., Pinto J. G. et al., The concurrence of atmospheric rivers and explosive cyclogenesis in the North Atlantic and North Pacific basins, *Earth System Dynamics*, 2018, V. 9, No. 1, pp. 91–102, DOI: 10.5194/esd-9-91-2018.
14. Fearon M. G., Doyle J. D., Finocchio P. M., Soil moisture influences on summer Arctic cyclones and their associated poleward moisture transport, *Monthly Weather Review*, 2023, V. 151, No. 7, pp. 1699–1716, DOI: 10.1175/MWR-D-22-0264.1.
15. Gimeno-Sotelo L., Nieto R., Vázquez M., Gimeno L., A new pattern of the moisture transport for precipitation related to the drastic decline in Arctic sea ice extent, *Earth System Dynamics*, 2018, V. 9, No. 2, pp. 611–625, DOI: 10.5194/esd-9-611-2018.
16. Groves D. G., Francis J. A., Moisture budget of the Arctic atmosphere from TOVS satellite data, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, V. 107, No. D19, Article 4391, DOI: 10.1029/2001JD001191.
17. Hao M., Luo Y., Lin Y. et al., Contribution of atmospheric moisture transport to winter Arctic warming, *Intern. J. Climatology*, 2019, V. 39, No. 5, pp. 2697–2710, DOI: 10.1002/joc.5982.
18. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al., The ERA5 global reanalysis, *Quarterly J. Royal Meteorological Soc.*, 2020, V. 146, No. 730, pp. 1999–2049, DOI: 10.1002/qj.3803.
19. Huang B., Chunying L., Banzon V., Improvements of the Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST) version 2.1, *J. Climate*, 2021, V. 34, No. 8, pp. 2923–2939, DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0166.1.
20. Kirbus B., Tiedeck S., Camplani A. et al., Surface impacts and associated mechanisms of a moisture intrusion into the Arctic observed in mid-April 2020 during MOSAiC, *Frontiers in Earth Science*, 2023, V. 11, Article 1147848, DOI: 10.3389/feart.2023.1147848.
21. Kong B., Liu N., Fan L et al., Evaluation of surface meteorology parameters and heat fluxes from CFSR and ERA5 over the Pacific Arctic Region, *Quarterly J. Royal Meteorological Soc.*, 2022, V. 148, No. 747, pp. 2973–2990, <https://doi.org/10.1002/qj.4346>.
22. Koyama T., Stroeve J., Cassano J., Crawford A., Sea ice loss and Arctic cyclone activity from 1979 to 2014, *J. Climate*, 2017, V. 30, No. 12, pp. 4735–4754, DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0542.1.

23. Liu C., Barnes E. A., Extreme moisture transport into the Arctic linked to Rossby wave breaking, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, V. 120, No. 9, pp. 3774–3788, DOI: 10.1002/2014JD022796.
24. Lubin D., Zou X., Mülmenstädt J. et al., Surface radiation trends at north slope of Alaska influenced by large-scale circulation and atmospheric rivers, 2025, *EGU sphere [preprint]*, 2025, 24 p., <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-2768>.
25. Ma W., Wang H., Chen G. et al., Wintertime extreme warming events in the high Arctic: characteristics, drivers, trends, and the role of atmospheric rivers, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2024, V. 24, No. 7, pp. 4451–4472, <https://doi.org/10.5194/acp-24-4451-2024>.
26. Naakka T., Nygård T., Vihma T. et al., Atmospheric moisture transport between mid-latitudes and the Arctic: Regional, seasonal and vertical distributions, *Intern. J. Climatology*, 2019, V. 39, No. 6, pp. 2862–2879, DOI: 10.1002/joc.5988.
27. Newman M., Kiladis G. N., Weickmann K. M. et al., Relative contributions of synoptic and low-frequency eddies to time-mean atmospheric moisture transport, including the role of atmospheric rivers, *J. Climate*, 2012, V. 25, No. 21, pp. 7341–7361, DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00665.1.
28. Papritz L., Dunn-Sigouin E., What configuration of the atmospheric circulation drives extreme net and total moisture transport into the Arctic, *Geophysical Research Letters*, 2020, V. 47, No. 17, Article e2020GL089769, DOI: 10.1029/2020GL089769.
29. Papritz L., Hauswirth D., Hartmuth K., Moisture origin, transport pathways, and driving processes of intense wintertime moisture transport into the Arctic, *Weather and Climate Dynamics*, 2022, V. 3, No. 1, pp. 1–20, DOI: 10.5194/wcd-3-1-2022.
30. Park H.-S., Lee S., Son S.-W. et al., The impact of poleward moisture and sensible heat flux on Arctic winter sea ice variability, *J. Climate*, 2015, V. 28, No. 13, pp. 5030–5040, DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0074.1.
31. Qin T., Ren H.-L., Zhao S. et al., Climatic characteristics and interannual influencing factors of extreme cyclones in the arctic cold season, *Climate Dynamics*, 2025, V. 63, No. 7, Article 283, 14 p., DOI: 10.1007/s00382-025-07762-0.
32. Reynolds R. W., Smith T. V., Liu C. H. et al., Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature, *J. Climate*, 2007, V. 20, No. 22, pp. 5473–5496, DOI: 10.1175/2007JCLI1824.1.
33. Schreiber E. A. P., Serreze M. C., Impacts of synoptic-scale cyclones on Arctic sea-ice concentration: a systematic analysis, *Annals of Glaciology*, 2020, V. 61, Iss. 82, pp. 139–163, <https://doi.org/10.1017/aog.2020.23>.
34. Sun W., Liang Y., Bi H. et al., Insight on poleward moisture and energy transport into the Arctic from ERA5, *Atmosphere*, 2022, V. 13, No. 4, Article 616, DOI: 10.3390/atmos13040616.
35. Tachibana Y., Komatsu K. K., Alexeev V. A. et al., Warm hole in Pacific Arctic sea ice cover forced mid-latitude Northern Hemisphere cooling during winter 2017–18, *Scientific Reports*, 2019, V. 9, No. 1, Article 5567, 12 p., DOI: 10.1038/s41598-019-41682-4.
36. The Arctic: State of the Climate in 2019, *Bull. American Meteorological Soc.*, 2020, V. 101, No. 8, pp. S243–S286, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0086.1>.
37. Uhlíková T., Vihma T., Karpechko A. Yu., Uotila P., Effects of Arctic sea-ice concentration on turbulent surface fluxes in four atmospheric reanalyses, *The Cryosphere*, 2024, V. 18, No. 2, pp. 957–976, <https://doi.org/10.5194/tc-18-957-2024>.
38. Vihma T., Screen J., Tjernström M. et al., The atmospheric role in the Arctic water cycle: A review on processes, past and future changes, and their impacts, *J. Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, V. 121, pp. 586–620, DOI: 10.1002/2015JG003132.
39. Villamil-Otero G. A., Zhang J., He J., Zhang X., Role of extratropical cyclones in the recently observed increase in poleward moisture transport into the Arctic Ocean, *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, V. 35, pp. 85–94, DOI: 10.1007/s00376-017-7116-0.
40. Walsh J. E., Intensified warming of the Arctic: Causes and impacts on middle latitudes, *Global and Planetary Change*, 2014, V. 117, pp. 52–63, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2014.03.003.
41. Wang W., Wang Y., Zhang J. et al., Assessment of the impact of Pacific inflow on sea surface temperature prior to the freeze-up period over the Bering Sea, *Remote Sensing*, 2024, V. 16, No. 1, Article 113, <https://doi.org/10.3390/rs16010113>.
42. Wang Z., Ding Q., Wu R. et al., Role of atmospheric rivers in shaping long term Arctic moisture variability, *Nature Communications*, 2024, V. 15, Article 5505, <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49857-y>.
43. White D., Hinzman L., Alessaet L. et al., The Arctic freshwater system: Changes and impacts, *J. Geophysical Research: Biogeosciences*, 2007, V. 112, Article G04S54, DOI: 10.1029/2006JG000353.
44. Woods C., Caballero R., The role of moist intrusions in winter Arctic warming and sea ice decline, *J. Climate*, 2016, V. 29, No. 12, pp. 4473–4485, DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0773.1.
45. Woods C., Caballero R., Svensson G., Large-scale circulation associated with moisture intrusions into the Arctic during winter, *Geophysical Research Letters*, 2013, V. 40, No. 17, pp. 4717–4721, DOI: 10.1002/grl.50912.

46. Yang W., Magnusdottir G., Springtime extreme moisture transport into the Arctic and its impact on sea ice concentration, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, V. 122, No. 10, pp. 5316–5329, DOI: 10.1002/2016JD026324.
47. Ye K., Cohen J., Chen H. W. et al., Attributing climate and weather extremes to Northern Hemisphere sea ice and terrestrial snow: Progress, challenges and ways forward, *npj Climate and Atmospheric Science*, 2025, V. 8, No. 1, Article 166, <https://doi.org/10.1038/s41612-025-01012-0>.
48. You C., Tjernström M., Devasthale A., Warm and moist air intrusions into the winter Arctic: a Lagrangian view on the near-surface energy budgets, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, V. 22, No. 12, pp. 8037–8057, DOI: 10.5194/acp-22-8037-2022.