Таблица

Значения коэффициентов корреляции, вычисленные разными методами определения испарения

Станция	Метод		
	Н.Н. Иванова	ERA5	GLEAM
Туманная	0,54	0,84	0,25
Апатиты	0,89	0,82	0,91
Зареченск	0,92	0,86	0,94
Умба	0,91	0,77	–
Каневка	0,86	0,81	0,80
Салехард	0,83	0,87	0,94
Туруханск	0,84	0,57	0,90
Жиганск	0,84	0,70	0,80
Верхоянск	0,91	0,63	0,70
Среднеколымск	0,93	0,89	0,39
Омолон	0,89	0,87	0,89
Островное	0,92	0,84	0,81

режима: в раннем периоде отрицательные тренды были сильными и согласованными, а после 1993 года тренды стали слабыми и разнонаправленными, ни один из них не значим. Тем не менее за весь период в целом отрицательный тренд остается значимым, что указывает на долговременное снижение испарения в российском Заполярье.

Метод Н.Н. Иванова характеризуется исключительно высокой и стабильной корреляцией с наблюденными значениями на всех без исключения площадках. Коэффициенты корреляции для этого метода варьируются в узком диапазоне от 0,83 до 0,93, причем большинство значений превышает 0,88. Даже минимальный показатель (0,83 на площадке в Салехарде) остается на очень высоком уровне, что говорит о надежности метода в любых условиях. На таких площадках, как Среднеколымск и Островное, корреляция достигает 0,92–0,93.

Метод ERA5 показывает менее стабильные результаты. При достаточно высоких значениях на ряде площадок (например, в Среднеколымске (0,89) и Омолоне (0,87)) он дает неудовлетворительные результаты в Туруханске (0,57) и Верхоянске (0,63). Это указывает на то, что метод чувствителен к местным условиям и не всегда обеспечивает приемлемую точность, особенно в континентальных или экстремальных климатических зонах.

Метод GLEAM показал более низкую эффективность. На ряде станций метод показывает высокую корреляцию (например, 0,94 в Зареченске и Салехарде, 0,91 в Апатитах), но на площадке Туманная корреляция падает до 0,248, оценка испарения по GLEAM оказывается существенно заниженной из-за того, что в расчетный пиксель продукта GLEAM с разрешением 0,25° попадает часть акватории моря. Аналогично низкий показатель (0,385) зафиксирован на Среднеколымске. Применение продукта GLEAM требует предварительной верификации на конкретной территории ввиду его высокой чувствительности к ландшафтным условиям (таблица).

Полученные в ходе работ результаты позволяют рекомендовать для оценки испарения в заполярной области метод Н.Н. Иванова, так как он единственный из трех рассматриваемых методов обеспечивает одновременно высокую точность и стабильность на всем диапазоне площадок. ERA5 может рассматриваться как альтернатива при условии отсутствия требований к максимальной надежности, а GLEAM рекомендуется только в тех случаях, когда его применимость для конкретного региона подтверждена независимыми данными.

А.Д. Журавлева, С.А. Иванова, Л.С. Курочкина
(ФГБУ «Государственный гидрологический институт»)

ТЕНДЕНЦИИ ВАРИАЦИЙ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ В АРКТИКЕ ЗА 2003–2025 ГОДЫ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МИССИИ GRACE)

Оценка ускорения свободного падения (далее УСП) на земной поверхности зависит от геодинамических процессов, географического положения, расположения Земли, Луны и Солнца, угловой скорости вращения Земли, синоптических процессов, льдов, климата и др.

Мониторинг изменений УСП в пределах Арктики охватывает широкий спектр задач: от оценки точности глобальных моделей геопотенциала до практических аспектов проведения высокоточных морских и аэрогравиметрических съемок в экстремальных полярных условиях, связи характеристик гравитационных аномалий с погодой (Макоско А.А., Ярошевич М.И. Оценки регрессионных связей характеристик тропических циклонов и аномалий силы тяжести // Известия РАН. Серия «Физика атмосферы и океана». Т. 52. № 3. С. 267–271), льдами, климатом. Модель гравитации Земли EGM2008 (Earth Gravitational Model 2008), благодаря космическим съемкам, почти на порядок улучшила разрешение по сравнению с EGM96, но для нее полярные регионы остаются проблемными.

Можно расширить эти исследования анализом космических измерений характеристик гравитационных аномалий (ХГА) по проектам GRACE/GRACE FO (NASA и Аэрокосмический центр Германии).

Данные космических измерений, характеризующие изменения гравитационного поля Земли, представлены в свободном доступе, но преобразованы в эквивалентные изменения поверхностной массы и представлены в виде безразмерного показателя гравитации (далее БПГ), вычисляемого как отношение измеренного изменения характеристики этого поля к значению, создаваемому массой слоя воды толщиной 1 см. Поэтому распределение в той или иной зоне нашей планеты значений БПГ качественно соответствует распределению в ней УСП. Значения указанного показателя представлены в базе данных для каждого месяца из периода 2003–2025 годов для всех узлов координатной сетки Меркатора с шагом 0,25° (интерполяция в узлы регулярной сетки сферическими функциями).

Анализ данных измерений показал, что ХГА, которые выявлены по космическим измерениям в северной полярной шапке до примерно 83 градуса широты, свойственна значимая межгодовая изменчивость. При этом их внутригодовая изменчивость существенной не является.

При выборе методики исследования как характеристика тенденции изменений БПГ над некоторым пунктом земной поверхности рассматривалось значение углового

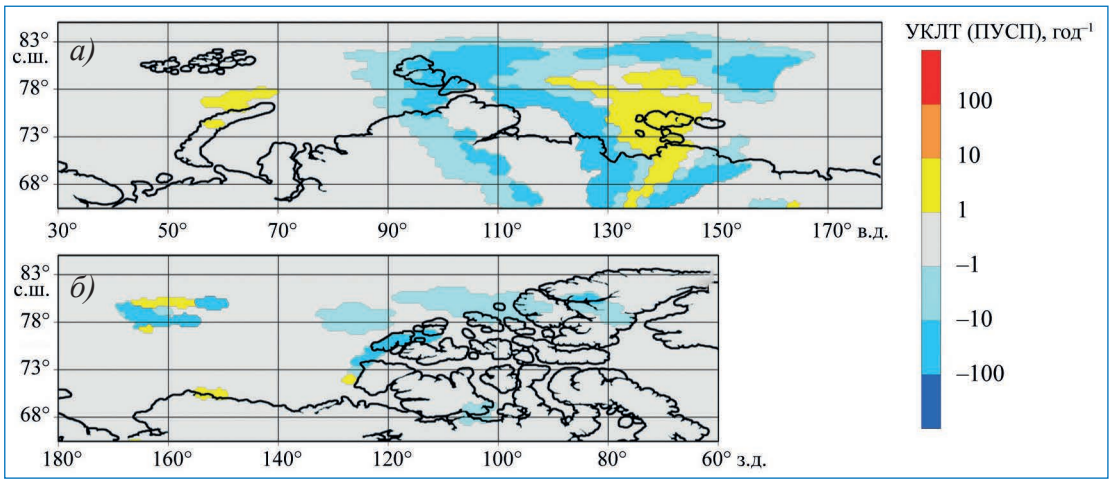

Рис. 1. Распределение значений углового коэффициента линейного тренда (УКЛТ) БПГ, соответствующих Арктическим зонам: *а* — России; *б* — Канады и США

коэффициента линейного тренда соответствующего временного ряда (УКЛТ).

Решение о том, что вычисленное значение упомянутого коэффициента (X) является значимым, принималось, если достоверность такого статистического вывода составляла не менее 0,95. Принималось допущение о том, что закон распределения аномалии является нормальным. Поэтому указанное решение принималось, если значение X по модулю превосходило 0,072 СКО, где СКО — среднеквадратическое отклонение X.

Указанная методика позволяет определить участки Арктики, где скорости межгодовых изменений УСП являются значимыми. Вместе с тем длина изучаемых временных рядов значений БПГ невелика. Поэтому корректно подтвердить справедливость принятых допущений с применением критерия Пирсона или иных критериев согласия не представляется возможным. Следовательно, выводы могут носить лишь качественный характер.

С применением изложенной методики рассматриваемые характеристики тенденции изменения БПГ определены к северу от параллели 65° с. ш. (Гринвичский меридиан принят за нулевой). Установлено, что вычисленные характеристики являются значимыми лишь над некоторыми участками Арктической зоны России, США и Канады. Положение выявленных участков представлено на рис. 1.

Из рис. 1*а* следует, что в Арктической зоне России существуют области, в которых значимые тенденции изменений БПГ (а значит, и УСП) имели противоположные знаки. Области, где БПГ значимо возрастали за 2003–2025 годы, обнаружены над акваторией Баренцева моря (у побережья Северного острова архипелага Новая Земля) и над восточной частью акватории моря Лаптевых (включая проливы Санникова и Дмитрия Лаптева). Области, где за тот же период БПГ (а также УСП) значимо уменьшались, выявлены над территориями Якутии и Красноярского края.

Они обнаружены также над акваториями восточной части Карского моря, западной и центральной части моря Лаптевых, а также над районами Арктического бассейна Северного Ледовитого океана, расположенными к северу от архипелага Анжу. Наибольшая средняя скорость снижения БПГ зафиксирована над участком акватории моря Лаптевых с координатами 73,25° с. ш. 125,5° в. д.

Аналогичные тенденции обнаружены над территориями островов архипелага Северная Земля, а также над многими участками полуострова Таймыр и плато Путорана (Красноярский край), дельты реки Лены, Северо-Якутской низменности и Верхоянского хребта (Якутия).

На рис. 1*б* видно, что над акваторией восточной части Чукотского моря (Арктическая зона США), моря Бофорта, а также над проливами между островами северной части Канадского Арктического архипелага (Арктическая зона Канады) величины УСП за 2003–2025 годы значимо снижались со скоростями, близкими к их значениям, характерным для области над морем Лаптевых.

Наибольшее значение УКЛТ БПГ в Западном полушарии находится над участком акватории Арктической зоны США, расположенным на границе Чукотского моря и моря Бофорта с координатами 78,25° с. ш. 155,5° з. д. Такие же тенденции зафиксированы над многими островами Канадского Арктического архипелага (относящимися к Арктической зоне Канады).

Таким образом, по результатам измерений миссий GRACE/GRACE FO выявлены участки Арктических зон России, а также США и Канады, на которых за 2003–2025 годы в межгодовых изменениях БПГ выявлены значимые тренды. В среднем в указанных регионах преобладают значимые тенденции к снижению этих показателей, а потому и к снижению УСП.

Последнее указывает на протекание в недрах Земли под морем Лаптевых, а также северными районами Якутии и Красноярского края геологических процессов, обусловливающих рекордно быстрое снижение УСП. Одним из таких процессов в указанных районах со значимым уменьшением эквивалентной поверхностной массы может быть накопление в их недрах значительных объемов газа, изменение ледовой обстановки, смещение Северного магнитного полюса (Тертышников А.В. Оценки положения северного магнитного полюса по измерениям с научно-исследовательского судна «Профессор Молчанов» 26.10.2021–09.11.2021 г. // Гелиогеофизические исследования. 2021. Вып. 31. С. 58–61.; Тертышников А.В. Оценки положения Северного магнитного полюса в 2021 г. по данным с научно-экспедиционного судна «Михаил Сомов» // Гелиогеофизические исследования. 2022. Вып. 34. С. 49–51; Тертышников А.В. Оценки положения Северного магнитного полюса в 2021 году // Геодезия и картография. 2024. Т. 85. № 7. С. 59–64). Возможны и иные объяснения, вследствие чего характер упомянутого процесса нуждается в дополнительном изучении.

А.В. Тертышников (Институт прикладной геофизики),
А.В. Холопцев
(Сибирская пожарно-спасательная академия)