

Изменения поля силы тяжести Земли — индикатор деградации зоны многолетней мерзлоты

А. В. Киселев, В. И. Горный, А. А. Тронин

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН
Санкт-Петербург, 199178, Россия
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

Исследование направлено на разработку технологии спутникового мониторинга состояния многолетней мерзлоты. Цель заключалась в проверке гипотезы снижения поля силы тяжести Земли при деградации многолетней мерзлоты под влиянием потепления климата. Основной гипотезы стал признак деградации многолетней мерзлоты — возрастание мощности сезонно-талого слоя. При росте глубины оттаивания и выносе в океан дополнительной массы сезонно-талых вод следовало ожидать снижение поля силы тяжести Земли. Базовым дистанционным методом проверки гипотезы выбрана спутниковая вариационная гравиметрия, выполнявшаяся системой спутников GRACE (*англ.* Gravity Recovery And Climate Experiment) за прошедшие два десятилетия. Анализ опирался на данные длительных режимных наблюдений за многолетней мерзлотой в скважинах (проект CALM (*англ.* Circumpolar Active Layer Monitoring Network)) и на цифровые карты линейных трендов температуры подстилающей поверхности, вегетационного индекса и осадков. Показано, что результаты спутниковой вариационной гравиметрии отражают рост мощности сезонно-талого слоя, что подтвердило выдвинутую гипотезу. В зоне многолетней мерзлоты Северной Евразии выявлены пространственно-временные особенности реакции поля силы тяжести Земли на потепление. За последние два десятилетия процесс деградации зоны многолетней мерзлоты Северной Евразии достоверно выявлен к западу от меридиана 140° в.д. К востоку от этого меридиана по материалам спутниковых съёмки пока не выявлено достоверных признаков деградации. Высказано предположение, что к востоку от меридиана 140° в.д. (бассейн р. Колымы и п-ов Чукотка) процесс деградации многолетней мерзлоты находится на начальном этапе и для его достоверного спутникового картирования требуется более длительный мониторинг. Получена достоверная регрессионная зависимость между суммой активной температуры подстилающей поверхности зоны многолетней мерзлоты Северной Евразии и толщиной эффективного слоя влаги в сентябре, рассчитанного по данным съёмки спутниками GRACE. В результате за последние два десятилетия верхняя оценка подъёма уровня Мирового океана из-за дополнительного поступления талых вод из зоны многолетней мерзлоты Северной Евразии не превысила 0,7 мм. Актуальность исследования определяется продолжающимся потеплением климата и связанными с этим угрозами разрушения зданий и линейных сооружений при деградации многолетней мерзлоты и повышения уровня Мирового океана.

Ключевые слова: потепление климата, Евразия, мерзлота, спутники, подстилающая поверхность, поле силы тяжести Земли, температура, вегетационный индекс, тренды, сезонно-талый слой, деградация мерзлоты

Одобрена к печати: 28.10.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-123-139

Введение

Наблюдающееся потепление климата приводит к деградации зоны многолетней мерзлоты (ЗММ) (Romanovsky et al., 2010). В результате к середине XXI в. в ней прогнозируется возрастание угрозы деформаций земной поверхности (https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf) в ЗММ. Для планирования противодействия этой угрозе требуется проведение мониторинга состояния ЗММ. Зона многолетней мерзлоты в России занимала около 60 % всей её площади (Достовалов, Кудрявцев, 1967). Поэтому с экономических позиций мониторинг её состояния целесообразно выполнять с применением дистанционного зондирования Земли из космоса.

Прошло уже более 20 лет как введены в эксплуатацию спутники дистанционного зондирования Земли (Terra/Aqua), GRACE (*англ.* Gravity Recovery And Climate Experiment)

и GRACE FO (англ. GRACE Follow-On), регулярно выполняющие глобальное картирование различных характеристик подстилающей поверхности (ПП), таких как температура (MOD11A1 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11a1v006>), MYD11A1 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/myd11a1v006/>)), спектральные индексы (MOD13A3 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13a3v006/>)), влагозапас (Vishwakarma et al., 2018). Для проведения регулярного мониторинга важную роль играет наличие открытых для свободного доступа архивов многолетних цифровых спутниковых материалов дистанционного зондирования Земли. Такие архивы позволяют перейти от эпизодического картирования характеристик ПП к разработке технологий мониторинга. Для мониторинга ЗММ особую роль играет новый метод — спутниковая вариационная гравиметрия* (СВГ), разработанная и реализованная в рамках проекта GRACE (Tapley et al., 2004). С 2002 г. последовательно запущено два тандема спутниковых систем GRACE и GRACE FO, которые ежемесячно выполняли картирование поля силы тяжести на всей территории нашей планеты, что позволило изучать «быстрые» изменения во времени (вариации) поля силы тяжести Земли. Известно, что быстрые (от месяца до нескольких лет) вариации поля силы тяжести Земли на исследуемых территориях вызываются, в основном, изменением влагосодержания в литосфере и атмосфере, приливными возмущениями, катастрофическими землетрясениями, сопровождающимися быстрым, значительным (до метра и более) смещением континентальных и океанических плит (Panet et al., 2010) и постледниковыми поднятиями, максимальная скорость которых на Балтийском кристаллическом щите в районе северной оконечности Ботнического зал. достигает 9 мм/год (Steffen et al., 2009).

Измеренные отклонения от среднего многолетнего уровня поля силы тяжести Земли пересчитываются в толщину эффективного слоя влаги (ТЭСВ**).

Спутниковая вариационная гравиметрия с успехом применяется для мониторинга деградации покровных ледников Антарктиды и Гренландии (Киселёв и др., 2016; Moholdt et al., 2012; Velicogna et al., 2014), так как таяние этих ледников приводит в конечном итоге к снижению массы ледника. Тот же эффект отмечен при таянии горных ледников в Гималаях (Bibi et al., 2019) и на Аляске (Arendt et al., 2008). Для Аляски эффект объясняется тем, что потепление климата приводит к ускорению таяния горного ледника и поступлению дополнительной массы талых вод в реки, переносу их в океан. В результате масса ледников снижается и уменьшается их вклад в поле силы тяжести (Arendt et al., 2008). Это объяснение наводит на мысль, что близкий эффект может быть и при деградации континентальной ЗММ. Показано (Дроздов и др., 2010), что при потеплении климата возрастает мощность сезонно-талого слоя (СТС). Следует ожидать, что, как и при деградации ледников, в ЗММ дополнительная масса талой воды должна за многолетний период в итоге поступать по рекам в океан. Таким образом, если количество осадков не изменяется, то в местах возрастания мощности СТС следует ожидать снижение массы верхней части мёрзлых пород и, соответственно, значения поля силы тяжести Земли, что при достаточной чувствительности спутниковой системы GRACE может быть зарегистрировано многолетним мониторингом.

К настоящему моменту имеется ряд публикаций, направленных на применение СВГ для картирования деградации ЗММ под влиянием потепления климата как на территории Северной Евразии и Северной Америки (Landerer, Swenson, 2012; Muskett, Romanovsky, 2009), так и в Тибете (Bibi et al., 2019). В работе (Muskett, Romanovsky, 2009) анализ материалов, полученных системой GRACE в течение 6 лет на территории всей Арктической зоны, основывался на предположении, что появление открытых и закрытых таликов может быть

* Под вариациями поля силы тяжести понимается изменение с течением времени этой величины в данной точке. Для недопущения путаницы с гравитационной градиентометрией, направленной на получение данных о распределении плотности пород в подземном пространстве по результатам измерения горизонтальных градиентов поля силы тяжести, этот спутниковый геофизический метод целесообразно называть спутниковой гравитационной вариометрией.

** ТЭСВ — толщина помещённого на земную поверхность плоскопараллельного слоя воды, эквивалентного по гравитационному эффекту зарегистрированному изменению поля силы тяжести относительно среднего уровня 2004–2009 гг.

зарегистрировано вариацией поля силы тяжести. Но при чувствительности системы спутников GRACE ~2 см ТЭСВ обнаружение молодых таликов возможно только в том случае, если их площадь будет не менее 300×300 км (Vishwakarma et al., 2018). Ясно, что за столь короткий срок наблюдения (6 лет) талики такого размера не формируются, что, на наш взгляд, и определило отсутствие положительных результатов этого исследования.

Применение СВГ при исследовании в ЗММ влагозапаса водосборных бассейнов крупных рек (Landerer et al., 2010) основано на изучении трендов элементов водного баланса. Этот баланс в зимнее время года включает аккумуляцию снежного покрова, его сублимацию и абляцию, а в тёплый период года — жидкие осадки, их сохранение в почве и водоёмах, сток воды по рекам, испарение с ПП. В упомянутом исследовании проверка результатов СВГ выполнена измерениями годового расхода воды на гидрологических постах крупнейших сибирских рек. Но это исследование также выполнено за короткий период — с 2003 по 2009 г., что, как отметили его авторы, явно недостаточно. Имея в виду, что среднегодовая температура тёплого периода меняется год от года, при чувствительности СВГ (2 см ТЭСВ) трудно получить убедительные результаты в столь короткий (6 лет) интервал времени.

В настоящем исследовании для оценки возможности применения СВГ для мониторинга деградации континентальной ЗММ за всё время реализации проекта GRACE (2002–2024) анализировалось пространственное распределение трендов ТЭСВ, полученных как ежемесячно, так и в сентябре, когда наблюдаются максимальные мощности СТС.

Таким образом, целями настоящего исследования становятся:

- проверка гипотезы, предполагающей, что в условиях глобального потепления за последние 24 года в ЗММ Северной Евразии рост мощности СТС мог привести к снижениям поля силы тяжести Земли, измеримым спутниками GRACE и GRACE FO;
- выявление в Северной Евразии пространственно-временных особенностей многолетних трендов ТЭСВ как индикатора роста мощности СТС под влиянием потепления климата.

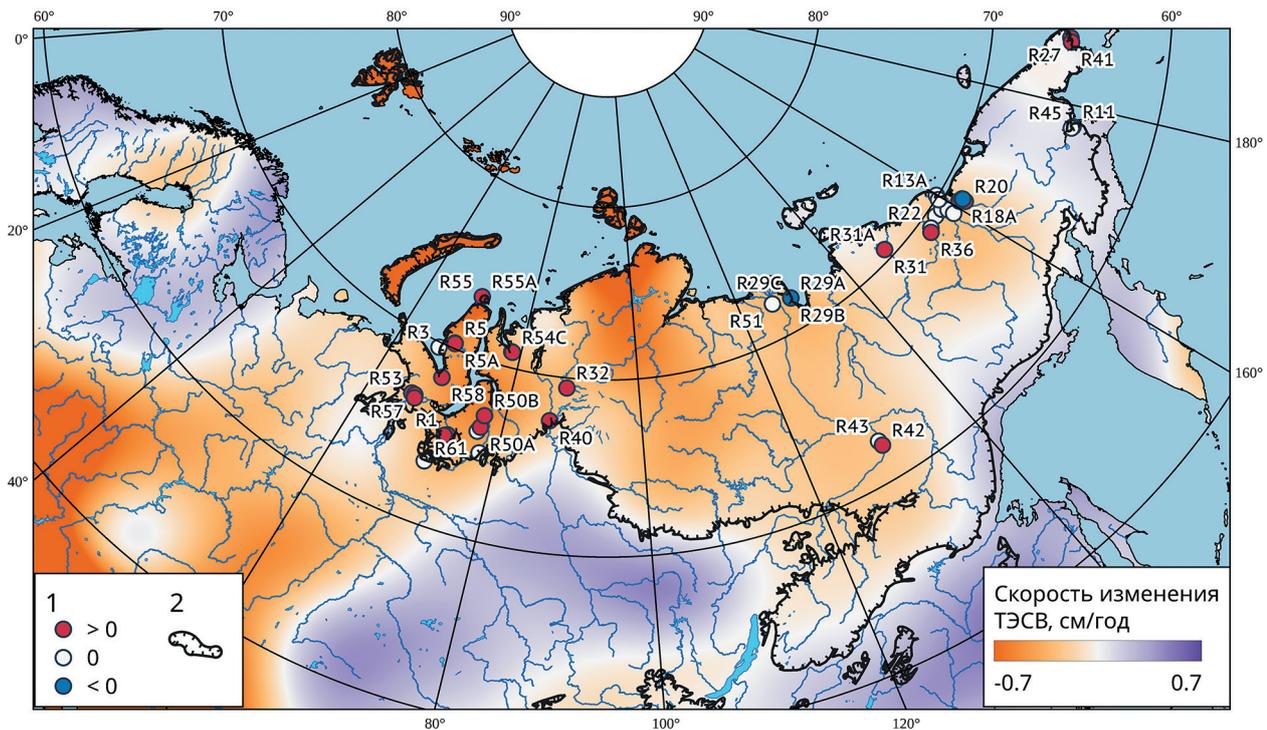
Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбрана северная часть Евразии, включающая всю площадь ЗММ на территории России (рис. 1, см. с. 126).

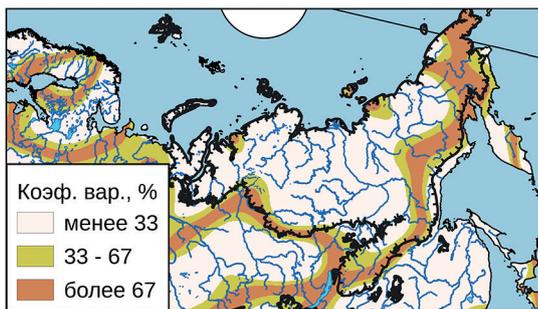
Таблица 1. Спутниковые материалы, использованные в исследовании

Спутник	Частота получения результатов	Период функционирования	Картируемая величина	Стандартный продукт
GRACE	1 мес	2002–2017 гг.	ТЭСВ, см	GRACE Level-3 RL06 Land Water-Equivalent-Thickness Surface-Mass Anomaly v.4
GRACE FO	1 мес	2018 г. — наст. время	ТЭСВ, см	GRACE Level-3 RL06.3 Land Water-Equivalent-Thickness Surface-Mass Anomaly v.4
Terra	2 раза/сут	2000 г. — наст. время	Температура, °С	MOD11A1 v.6.1 (https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/lpcloud-mod11a1-061)
Aqua	2 раза/сут	2002 г. — наст. время	Температура, °С	MOD11A1 v.6.1 (https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/lpcloud-myd11a1-061)
Terra	1 мес	2000 г. — наст. время	НДВИ, доли ед.	MOD13A3 (https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/lpcloud-mod13a3-006)
Миссия GPM	1 раз/сут	2000 г. — наст. время	Осадки, мм/сут	GPM_3IMERGM v.07 (https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM_3IMERGHH_07/summary)

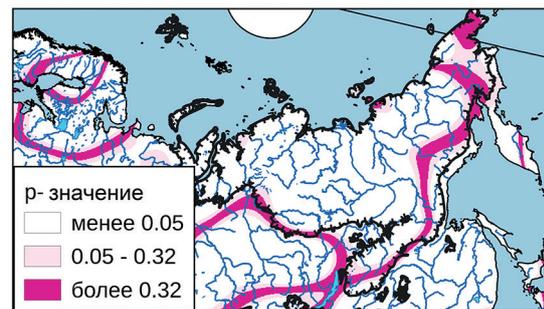
Примечание: GPM (англ. Global Precipitation Measurement).



а



б



в

Рис. 1. Цифровые карты Северной Евразии за 2002–2024 гг., построенные по результатам ежемесячных съёмок спутниками серии GRACE: а — линейный тренд ТЭСВ (1 — пункты наземного мониторинга мощности СТС и их номера, синий цвет — уменьшение глубины СТС, красный — рост глубины СТС, белый — ситуация без измеримых изменений, 2 — граница ЗММ (Obu et al., 2019)); б и в — здесь и далее соответственно коэффициент вариации и *p*-значение — достоверности картирования тренда

Гидрологический баланс и мерзлотный режим территорий определяется такими климатическими факторами, как температура, осадки, поверхностный и подземный стоки и испарение/сублимация снега (Анисимов, Кокорев, 2017). Кроме того, растительность является чувствительным индикатором изменения мерзлотного режима (Bjorkman et al., 2018). Поэтому для анализа связи изменений ТЭСВ с изменениями температуры, вегетационного индекса ПП и количества осадков был подготовлен комплект цифровых карт (табл. 1).

В настоящем исследовании использованы стандартные продукты GRACE CSR Level-3 RL06 v.4 отклонений ТЭСВ в сантиметрах от среднего значения (<https://grace.jpl.nasa.gov/data/get-data/monthly-mass-grids-land/>) из центра PODAAC (англ. Physical Oceanography Distributed Active Archive Center) (https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/TELLUS_GRAC_L3_CSR_RL06_LND_v04), полученные в результате обработки материалов съёмок системами GRACE и GRACE FO.

Продукт уровня Level-3 содержит 60 сферических гармоник. Дополнительно к продукту уровня Level-2 внесены поправки за послеледниковое поднятие в Фенноскандии, содержа-

ние атмосферной влаги и эллиптичность Земли, что важно для Арктической зоны Северной Евразии. Полное описание характеристик использованных материалов приведено в работах (Boergens et al., 2022; Dahle et al., 2019; Dobslaw, Boergens, 2025).

Подготовленные цифровые карты построены с характерным размером пикселя в ~111 км на экваторе (Landerer, Swenson, 2012), хотя разрешающая способность СВГ для пространственного разрешения водосборных бассейнов оценена как ~300×300 км (Vishwakarma et al., 2018). Среднеквадратическая погрешность картографирования ТЭСВ по результатам месячного цикла измерений в зависимости от широты исследуемого региона, а также климатических факторов составляет ~2,0 см (Landerer, Swenson, 2012; Swenson, Wahr, 2006; https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/TELLUS_LAND_NC_RL05). Такая чувствительность позволила надеяться на возможность регистрации изменений поля силы тяжести, вызванной деградацией ЗММ на интервале времени в более чем два десятилетия, так как по данным мониторинговых скважинных наблюдений в Западной Сибири за последние 15 лет в ряде мест отмечалась скорость роста мощности СТС, достигающая 5 см/год (табл. 2). На цифровые карты нанесены границы ЗММ, заимствованные из работы (Obu et al., 2019).

Таблица 2. Пункты наземных наблюдений за состоянием ЗММ на территории Северной Евразии*

Код	Регион	Координаты, град		Скорость изменения мощности СТС, см/год	Код	Регион	Координаты, град		Скорость изменения мощности СТС, см/год
		с. ш.	в. д.				с. ш.	в. д.	
R1	Западная Сибирь	65,33	72,92	3,5	R36	Колыма	69,17	154,43	0,4
R11	Чукотка	64,57	177,20	0,1	R38A	Колыма	68,73	161,40	0,1
R13A	Колыма	70,08	159,92	-0,2	R38B	Колыма	68,72	161,53	-0,5
R13B	Колыма	70,08	159,92	-0,1	R38C	Колыма	68,70	161,55	-1,0
R14	Колыма	69,49	156,99	0,2	R40	Игарка	67,48	86,44	2,7
R15A	Колыма	69,41	158,45	-0,3	R41	Чукотка	65,54	-171,63	1,4
R15B	Колыма	69,41	158,45	-0,2	R42	Якутия	62,01	129,66	0,5
R16	Колыма	69,09	158,90	-0,5	R43	Якутия	62,32	129,50	0,2
R17	Колыма	68,81	160,99	0,6	R45	Чукотка	64,63	176,97	0,3
R18	Колыма	68,74	161,50	0,0	R46	Р. Чара	56,76	118,19	-0,9
R18A	Колыма (сеть 10 м)	68,75	161,50	0,4	R5	П-ов Ямал	70,28	68,90	0,7
R19	Колыма	68,80	160,96	0,3	R50A	Западная Сибирь	66,32	76,91	3,4
R1B	Западная Сибирь	65,23	72,52	5,8	R50B	Западная Сибирь	67,00	77,00	2,4
R2	Воркута	67,58	64,18	0,6	R51	Западная Сибирь	72,00	126,00	0,5
R20	Колыма	68,52	161,43	0,5	R52	Полярный Урал	67,04	62,55	1,2
R21	Колыма	68,83	161,03	-0,1	R53	Полярный Урал	66,72	66,08	2,6
R22	Колыма	69,32	154,97	0,1	R54A	Гыданский п-ов	70,89	78,42	1,3
R23	Тальник	67,33	63,73	2,6	R54B	Гыданский п-ов	70,89	78,43	0,8
R24	о. Вайгач	68,29	54,51	0,0	R54C	Гыданский п-ов	70,87	78,55	1,3
R24A	о. Кашин	68,23	53,85	3,7	R55	Карское море	73,33	70,09	0,4
R25	Якутия	69,85	159,49	-0,2	R55A	Карское море	73,33	70,09	2,1

* CALM (англ. Circumpolar Active Layer Monitoring Network) (<https://www2.gwu.edu/~calm/>).

Окончание табл. 2

Код	Регион	Координаты, град		Скорость изменения мощности СТС, см/год	Код	Регион	Координаты, град		Скорость изменения мощности СТС, см/год
		с. ш.	в. д.				с. ш.	в. д.	
R27	Чукотка	65,60	–171,05	0,6	R56	Западная Сибирь	66,71	66,57	3,9
R29A	Дельта р. Лены	71,79	129,42	0,3	R57	Западная Сибирь	66,70	66,36	1,2
R29B	Дельта р. Лены	71,78	129,40	0,1	R58	П-ов Ямал	68,23	69,14	5,6
R29C	Дельта р. Лены	71,79	129,42	0,7	R59	Западная Сибирь	66,54	66,73	6,5
R3	П-ов Ямал	69,72	66,75	0,6	R5A	П-ов Ямал	70,28	68,89	0,6
R30A	Камчатка	55,75	160,29	0,4	R5B	П-ов Ямал	70,30	68,88	0,7
R30B	Камчатка	55,77	160,32	1,0	R5C	П-ов Ямал	70,30	68,84	1,5
R30C	Камчатка	55,89	160,54	0,3	R5D	П-ов Ямал	70,27	68,89	0,8
R31	Бассейн р. Индигирки	70,56	147,43	0,0	R60	Западная Сибирь	66,57	66,88	–3,0
R31A	Бассейн р. Индигирки	70,57	147,42	–5,0	R61	Западная Сибирь	66,05	76,64	–2,9
R32	Талнах (Норильск)	69,43	88,47	1,3		Колыма	69,17	154,43	0,4
R35	Омолон	68,72	158,90	0,0					

В исследовании использованы результаты наблюдений на 65 мерзлотных полигонах (см. рис. 1, табл. 2), где в скважинах по узлам регулярной сети 100×100 м на площадках размером 1000×1000 м, а на площадках 100×100 м — в узлах сети 10×10 м в течение не менее 10 последних лет по стандартной методике проводились измерения мощности СТС.

В рамках исследования выполнен регрессионный анализ для выявления связей ТЭСВ с мощностью СТС, суммами активной (более +10 °С) температуры ПП, нормализованным дифференциальным вегетационным индексом (НДВИ).

Для пространственного анализа изменений ТЭСВ в пределах всей Северной Евразии по результатам ежемесячных съёмок спутниками серии GRACE была построена цифровая карта многолетнего тренда ТЭСВ (см. рис. 1). Положительные приращения ТЭСВ (синий цвет на карте) указывали на её рост, а отрицательные (красный цвет) — на снижение. Значения скорости изменения (трендов) ТЭСВ, лежащие за пределами чувствительности метода, показаны белым цветом (см. рис. 1).

Для проверки гипотезы о достаточности чувствительности системы спутников GRACE для регистрации наблюдаемого на тестовых полигонах роста мощности СТС в процессе деградации ЗММ по ежегодным сентябрьским значениям ТЭСВ в каждом пикселе находилась скорость изменения (линейный тренд) ТЭСВ за период с 2002 по 2024 г. Сентябрьские значения ТЭСВ выбраны потому, что в это время по данным режимных наблюдений в скважинах наблюдалась максимальная мощность СТС и следовало ожидать максимальную чувствительность СВГ к процессу деградации ЗММ. Значения ТЭСВ сравнивались с ежегодной мощностью СТС, полученной на тестовых полигонах в течение многолетнего интервала времени.

Для определения скорости многолетних изменений дистанционно измеряемых характеристик (трендов) с помощью метода наименьших квадратов рассчитывались коэффициенты линейной регрессии по времени (скорость изменения показателя во времени) и характеристики статистической значимости этой регрессии:

- p -значение;
- коэффициент вариации: $Var(x, y) = h(x, y)/M(x, y)$, где $h(x, y)$ — закартированное значение дистанционно измеренной характеристики на площадке с координатами x, y ; $M(x, y)$ — математическое ожидание средних показателей картируемой величины.

Цифровые карты коэффициентов линейной регрессии, $p(x, y)$ и $Var(x, y)$ помещены в каждый комплект материалов. Анализ всего комплекта цифровых карт позволяет судить, во-первых, о надёжности определения тренда, которая оказалась достаточной для обоснования сделанных выводов. Во-вторых, о стабильности во времени факторов, определяющих тренд ТЭСВ, что позволяет делать среднесрочный прогноз.

Сопоставление цифровой карты линейного тренда ТЭСВ с другими подготовленными цифровыми картами и наземными данными выполнялось как визуально, так и построением регрессий.

Результаты

Основным результатом стала карта скорости многолетнего изменения (тренда) ТЭСВ за 2002–2024 гг. (см. *рис. 1*). Анализ карты показывает, что в пределах большей части ЗММ за последние два десятилетия наблюдается понижение ТЭСВ: в северной части Западной Сибири (п-ов Ямал, п-ов Тазовский, районы Уренгоя и Надыма); на п-ове Таймыр и на Среднесибирском пл-рье; в бассейне р. Колымы. Особенно высокая скорость снижения ТЭСВ отмечается на островах Северного Ледовитого океана, расположенных к западу от меридиана 140° (см. *рис. 1*). В начале XXI в. по материалам съёмки спутниковой лазерной альтиметрии — ICESat (*англ.* Ice, Cloud and land Elevation Satellite) (<https://sealevel.nasa.gov/missions/icesat>) — и спутников GRACE на этих островах было зафиксировано значительное уменьшение высоты и площади покровных ледников (Moholdt et al., 2012). В то же время на островах, расположенных к востоку от меридиана 140° (см. *рис. 1*), за последний 21 год достоверных изменений ТЭСВ не выявлено. Близкая картина наблюдается и на суше. К западу от меридиана 140° в пределах ЗММ (на севере Западной Сибири и в Центральной Сибири) за это время ТЭСВ значительно снизилась (см. *рис. 1б, в*), местами на $20 \text{ см}_{\text{H}_2\text{O}}$ (см. *рис. 1*). Такое снижение ТЭСВ превышает чувствительность СВГ и может считаться достоверным. Кроме того, низкие p -значения (см. *рис. 1б*) показывают, что скорость изменения (тренд) ТЭСВ закартирована с высокой степенью статистической надёжности, а малые значения коэффициента вариации указывают на постоянно действовавший в течение двух последних десятилетий природный фактор, вызвавший снижение ТЭСВ (см. *рис. 1в*). Необходимо отметить, что уменьшение ТЭСВ в Каспийском регионе и на юге Восточно-Европейской равнины, как нами отмечалось ранее (Киселёв и др., 2015, 2016; Gornyy et al., 2023), связано с засухой, также индицирующей отрицательным многолетним трендом ТЭСВ.

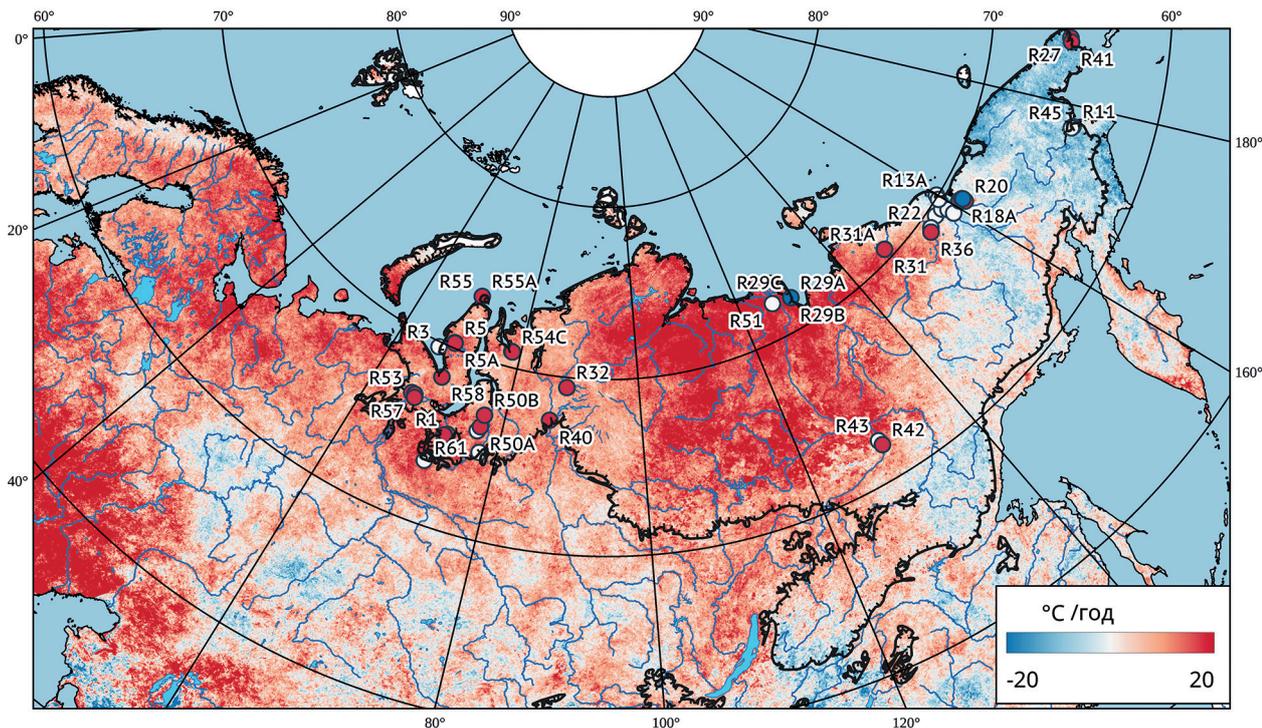
Важным моментом является то, что в Сибири как на южной и западной окраинах ЗММ, так и на тихоокеанском побережье Сибири наблюдается хорошее пространственное совпадение положения границы ЗММ (см. 2 на *рис. 1а*) с узкой зоной смены знака значений тренда ТЭСВ с отрицательных на положительные (белый цвет на *рис. 1а*). При этом на большей части территории ЗММ в Западной Сибири, на Среднесибирском пл-рье и п-ове Таймыр тренды ТЭСВ характеризуются высокой достоверностью и низкой вариативностью факторов, вызвавших тренд (см. *рис. 1*). Более того, зона смены знака тренда ТЭСВ (белый цвет на *рис. 1а*), совпадающая с границей ЗММ (см. 2 на *рис. 1а*) расположена внутри узких зон низкой достоверности определения тренда ТЭСВ (см. *рис. 1б*) и высокой вариативности (см. *рис. 1в*), ограничивающих ЗММ. Это совпадение позволяет сделать заключение, что области смены знаков тренда ТЭСВ в сочетании с высокими значениями p -показателя и коэффициента вариации соответствуют границе ЗММ.

На суше, к востоку от меридиана 140° , в бассейне р. Колымы надёжно (см. *рис. 1б, в*), но менее контрастно, чем к западу от меридиана 140° , выделяется ещё одна область понижения

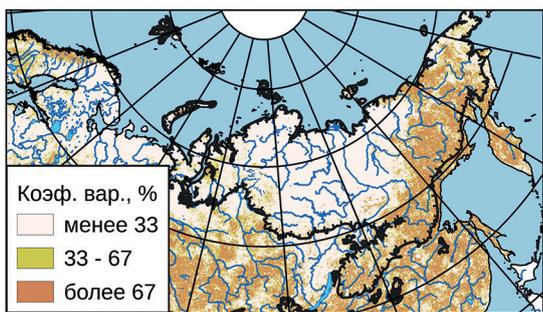
ТЭСВ (см. *рис. 1а*). С востока эта область граничит с п-овом Чукотка, где вдоль всего тихоокеанского побережья этого полуострова и далее на юг между границей ЗММ и берегом океана наблюдается полоса стабильного роста ТЭСВ (см. 2 на *рис. 1а*). Это ещё раз указывает на то, что многолетнее понижение ТЭСВ в сочетании с низкой достоверностью и высокой вариативностью линейного тренда ТЭСВ индицирует границу ЗММ.

Обсуждение результатов

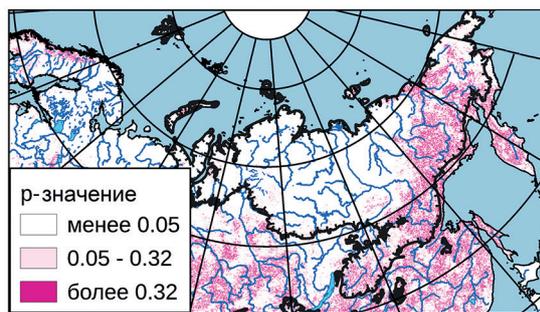
Качественный анализ закономерностей пространственного распределения линейного тренда ТЭСВ



а



б



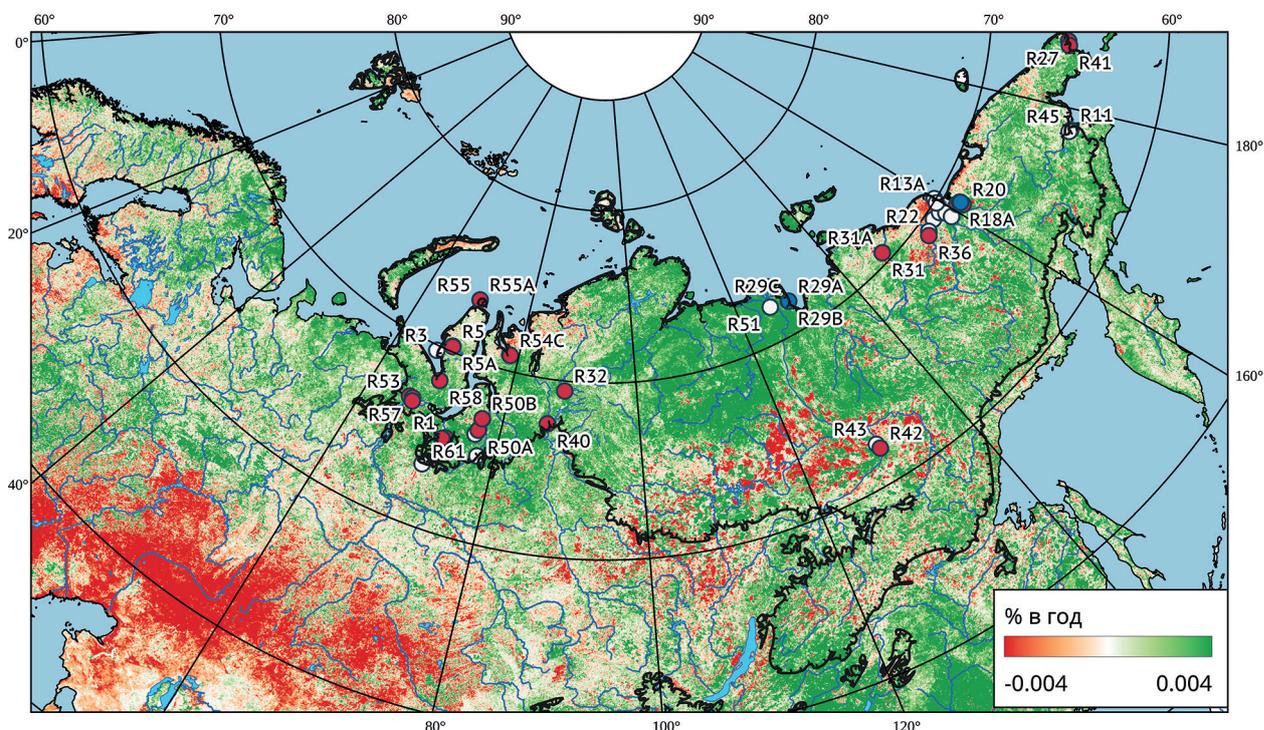
в

Рис. 2. Цифровые карты Северной Евразии за 2003–2024 гг., построенные по результатам ежедневных тепловых съёмок спутниками Terra/Aqua (MODIS): *а* — линейный тренд SAT на ПП (1 — пункты наземного мониторинга СТС и их номера, 2 — граница зоны ЗММ (Obu et al., 2019)); *б* и *в* — см. описание к *рис. 1*

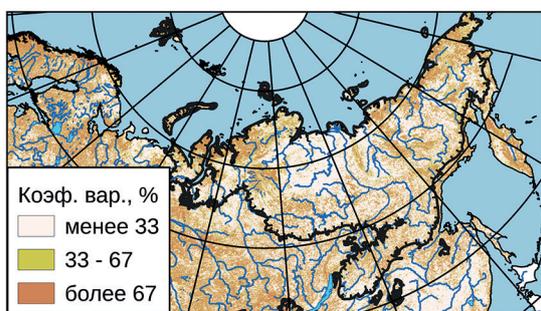
В основе верифицируемой гипотезы лежит положение о наблюдающемся потеплении климата. Поэтому в первую очередь были проанализированы многолетние изменения суммы активной температуры (САТ) ПП Северной Евразии (*рис. 2*). Анализ цифровой карты тренда САТ ПП (см. *рис. 2*) показывает, что за последние два десятилетия достоверно (см. *рис. 2б, в*)

выявляется нагрев ПП на севере Западной Сибири, Среднесибирском пл-рье, п-ове Таймыр и территории, лежащей между нижними течениями р. Лены и р. Колымы. Скорость повышения САТ на Среднесибирском пл-рье достигала 20 °С/год. На этих же территориях отмечено снижение ТЭСВ (см. *рис. 1*). Тем не менее восточнее меридиана 140° нагрева ПП не выявлено. Наоборот, в бассейне р. Колымы и на п-ове Чукотка закартировано понижение САТ, хотя достоверность тренда САТ на Колымском участке низкая и отмечается высокая вариативность факторов, определяющих изменение САТ (см. *рис. 2б, в*).

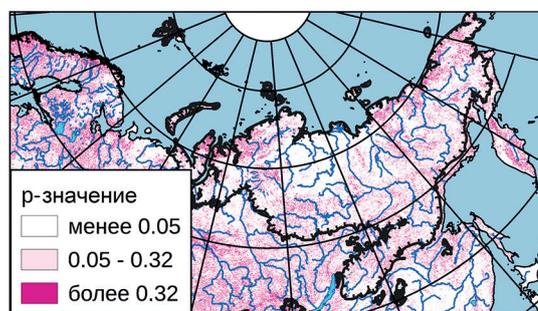
Необходимо отметить, что на пункте R20 (см. 1 на *рис. 1*), расположенном в пределах бассейна р. Колымы, зарегистрировано незначительное снижение САТ и уменьшение мощности СТС, т.е. отмечено промерзание (см. *рис. 1*). При этом в непосредственной близости от этого пункта находится пункт R36, на котором зарегистрирован рост глубины СТС. Такое рассогласование результатов наблюдения СТС в скважинах и спутникового мониторинга САТ объясняется низкой достоверностью картирования тренда САТ в этом районе (см. *рис. 2б, в*), так как это переходная зона от области протаивания к территории промерзания. Кроме того, локальные природные особенности в районе площадок, где выполнялся мониторинг мощности СТС, могут влиять на мерзлотный режим.



а

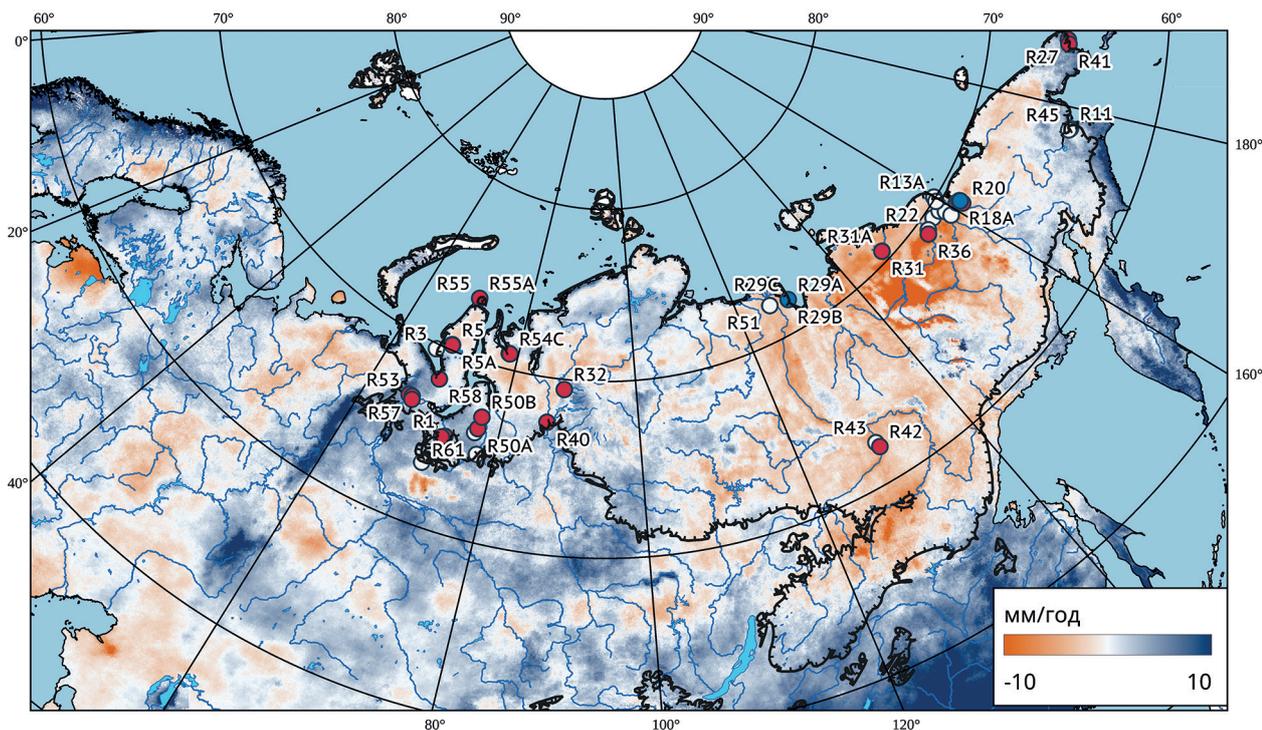


б

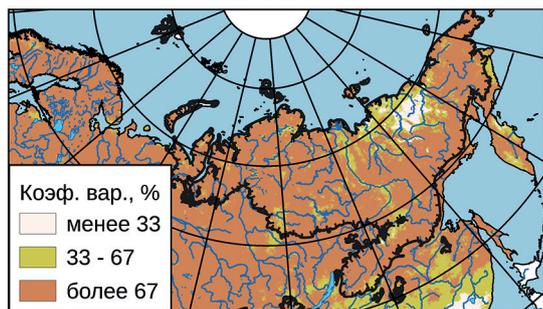


в

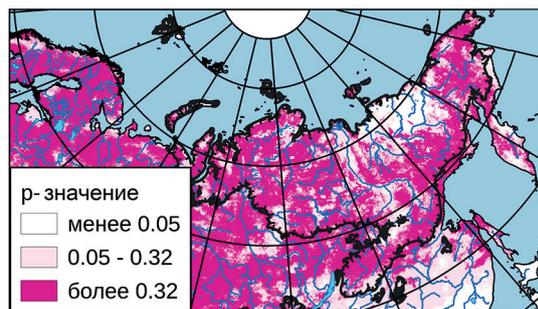
Рис. 3. Цифровые карты Северной Евразии за 2000–2024 гг., построенные по результатам ежедневных многоспектральных съёмок спутником Terra (MODIS): а — линейный тренд НДВИ (1 — пункты наземного мониторинга СТС и их номера, 2 — граница зоны ЗММ (Obu et al., 2019)); б и в — см. описание к *рис. 1*



а



б



в

Рис. 4. Цифровые карты Северной Евразии за 2000–2013 гг., построенные по результатам ежедневных съёмов спутниками: а — линейный тренд суммы осадков за вегетационный период (1 — пункты наземного мониторинга СТС и их номера, 2 — граница зоны ЗММ (Obu et al., 2019)); б и в — см. описание к рис. 1

Сопоставление цифровых карт многолетних трендов ТЭСВ (см. рис. 1), САТ (см. рис. 2) и трендов НДВИ (рис. 3, см. с. 131) показывает, что пространственное распределение растительности очень хорошо индицирует многолетний нагрев ПП, что не противоречит хорошо доказанному положительному влиянию роста САТ на развитие растительности. Особенно отчётливо этот эффект прослеживается на севере Западной Сибири и Среднесибирском пл-рье. Обращает внимание, что некоторое понижение тренда САТ в Колымской обл. и на Чукотке (см. рис. 2) не отразилось на снижении тренда НДВИ, а наоборот, большая часть этой территории характеризуется высокой достоверностью положительного тренда НДВИ (см. рис. 3б, в). Это потребовало дополнительного анализа. Было проведено сопоставление цифровых карт трендов НДВИ (см. рис. 3) и осадков (рис. 4). Анализ показал, что за исследуемый период в пределах всей Сибири только Колымская обл. характеризуется достоверно закартированным отрицательным трендом суммы осадков (см. рис. 4б, в). Это подтверждено в докладе Росгидромета (https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf) и в работе (Василевская, Сточкуче, 2017). Отмечено, что зимой на Северо-Востоке страны осадки убывают. Уменьшение мощности снежного покрова могло

привести к более интенсивному промораживанию толщи активного слоя зимой, уменьшению мощности СТС и, как результат, к снижению тренда САТ (Анисимов, Кокорев, 2017). Тем не менее остаются неясными причины совпадения отрицательно тренда САТ на п-ове Чукотка (см. *рис. 2*) с достоверным ростом НДВИ (см. *рис. 3*). Этот момент требует дополнительных исследований.

Качественное районирование территории ЗММ по комплексу дистанционно измеренных характеристик показало, что мерзлотный режим к западу от меридиана 140° в.д. отличается от восточной части ЗММ. В связи с этим количественный анализ связей трендов ТЭСВ и САТ выполнен только для территории ЗММ Сибири, расположенной к западу от меридиана 140° в.д.

Количественный анализ закономерностей пространственного распределения линейного тренда ТЭСВ

Как следует из *рис. 2а* тренд САТ ПП изменяется в широких пределах. Известно (Горный и др., 1993; Матвеев, 1965), что температура ПП определяется многими факторами: климатическими, отражательными свойствами ПП, теплофизическими свойствами грунтов, наличием и типом растительного покрова, рельефом и экспозицией ПП и т.д. Поэтому для количественного анализа статистических связей ТЭСВ и САТ в пределах ЗММ использовались осреднённые для всей ЗММ к западу от меридиана 140° в.д. значения САТ (*рис. 5б*) и ТЭСВ, полученные в сентябре каждого года (см. *рис. 5а*). Анализ этих результатов показал, что тренд ТЭСВ во времени — отрицательный за весь период наблюдений (см. *рис. 5а*), а тренд САТ — положительный за тот же период (см. *рис. 5б*), при высокой достоверности определения трендов. Эти закономерности позволили перейти к изучению соотношений между САТ и ТЭСВ (*рис. 6*, см. с. 134).

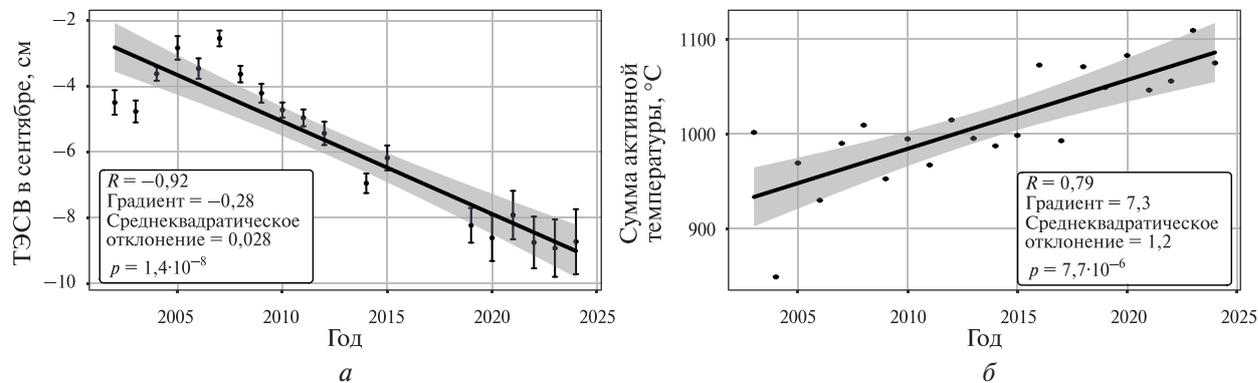


Рис. 5. Многолетние изменения дистанционно измеренных характеристик, средних по площади ЗММ Северной Евразии (к западу от меридиана 140° в.д.): *а* — сентябрьские значения ТЭСВ; *б* — годовые САТ. Вертикальные отрезки для значений характеристик каждого года — доверительные интервалы определения среднего по всей площади значения. Серым цветом показан доверительный интервал определения линейного тренда

Анализ регрессии (см. *рис. 6*) показал, что при возрастании суммы активной температуры ПП снижаются средние на исследуемой территории значения ТЭСВ, что подтверждает высказанную гипотезу об уменьшении ТЭСВ под действием потепления климата при росте СТС и скатывания дополнительных масс талых вод в океан.

Анализ многолетних результатов мониторинга мощности СТС в скважинах и синхронных изменений ТЭСВ (поля силы тяжести Земли), зарегистрированных спутниками серии GRACE за последние два десятилетия, показывает, что на большинстве наземных пунктов наблюдений в ЗММ Северной Евразии росту мощности СТС достоверно (p -значение менее 0,05) соответствует снижение ТЭСВ (см., например, 1 на *рис. 1* и 7, см. с. 134).

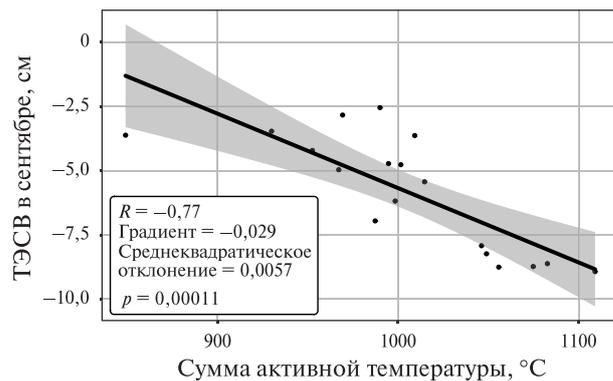


Рис. 6. Регрессионная связь сентябрьских значений ТЭСВ с САТ. Серым цветом показан доверительный интервал определения линейного тренда

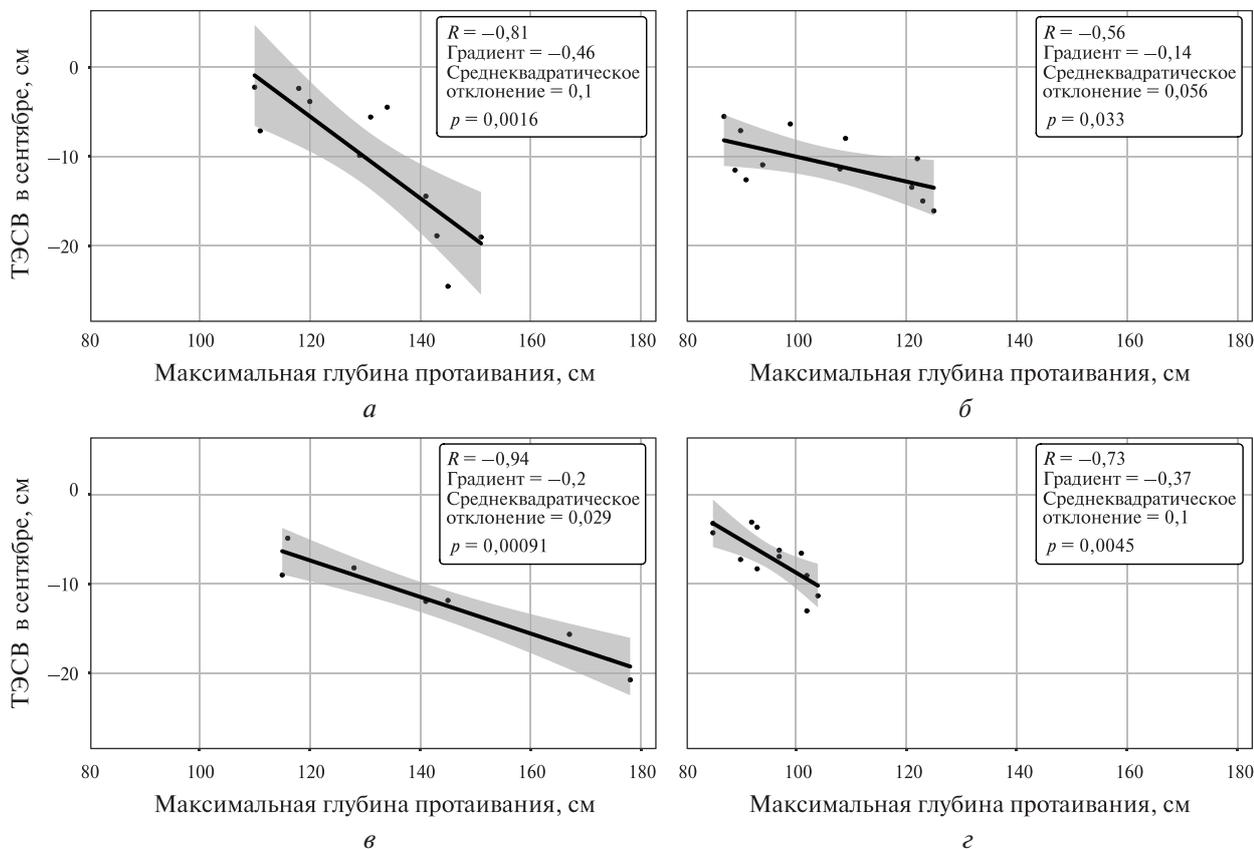


Рис. 7. Регрессионные связи мощности СТС и синхронных значений ТЭСВ (см. рис. 1), построенные для следующих пунктов наблюдений СТС: а — R55 — Белый о.; б — R40 — Игарка; в — R1 — Надым; г — R5 — п-ов Ямал

Анализ литературы подтвердил наше заключение о том, что снижение тренда ТЭСВ на п-ове Ямал, в районах Надыма и Уренгоя индицирует рост мощности СТС и в конечном итоге деградацию ЗММ (Дроздов и др., 2010; Romanovsky et al., 2010). Кроме того, по всей ЗММ Западной и Центральной Сибири пространственное распределение тренда ТЭСВ в общих чертах не противоречит результатам математического моделирования аномалий среднемноголетней мощности СТС за период 2004–2013 гг. по сравнению с нормой 1961–1990 гг. (Анисимов, Кокорев, 2017).

Дополнительным подтверждением индикации снижения поля силы тяжести Земли мест деградации ЗММ и скатывания части талой воды по рекам в океан следует считать отме-

ченное в 1976–2017 гг. увеличение на 7 % годового стока рек в арктические моря Сибири и Дальнего Востока по сравнению с периодом 1946–1975 гг. (Гельфан и др., 2021).

Приведённые выше результаты исследования позволяют утверждать, что многолетний рост мощности СТС индицируется снижением ТЭСВ, что подтверждает выдвинутую гипотезу о выносе вызванных потеплением климата дополнительных масс талой воды за пределы ЗММ.

Получаем оценку снижения влагозапаса ЗММ Сибири за период с 2002 по 2023 г. в объёме $\sim 2,7 \cdot 10^{11} \text{ м}^3$ на основе результатов проверки выдвинутой гипотезы, используя выражение:

$$V = \sum_{\tau_0=2002}^{\tau_f=2024} \sum_{x=1; y=1}^{x, y} S \{h[x, y(\tau+1)] - h(x, y, \tau)\},$$

где V — объём талой воды (в м^3), покинувшей ЗММ за период с 2002 по 2024 г. из-за деградации ЗММ; S — площадь одного пикселя карты ТЭСВ (в м^2); h — ТЭСВ в данном году; τ — номер года с начала мониторинга; x и y — соответственно номера столбцов и рядов цифровой карты.

Предполагая, что вся талая вода, за исключением оставшейся в появившихся термокарстовых озёрах, в конечном итоге под действием силы тяжести поступила в океан, а не была в результате испарения с поверхности перенесена атмосферой в другие регионы суши, получаем **верхнюю** оценку вклада талых вод Северной Евразии в подъём уровня Мирового океана за период 2002–2024 гг. в размере менее $\sim 0,7$ мм или $\sim 0,03$ мм/год (при площади Мирового океана $\sim 361 \cdot 10^{12} \text{ м}^2$). Сравнение с ежегодной скоростью подъёма уровня Мирового океана за последние 30 лет, оценённой как 2,1–4,5 мм/год (Hamlington et al., 2024), показывает, что деградация ЗММ Северной Евразии за последние два десятилетия не является основной причиной повышения уровня Мирового океана.

Заключение

На основе анализа больших массивов (*англ.* big data) архивных цифровых материалов спутниковых съёмок, полученных в период с 2022 по 2024 г., проверена гипотеза о том, что за этот период под действием потепления климата в ЗММ Сибири произошло измеримое спутниками GRACE снижение ТЭСВ, отражающее рост мощности СТС и скатывания части дополнительной массы сезонно-талых вод в океан.

Показано, что граница ЗММ индицируется узкой переходной зоной значений линейного тренда ТЭСВ (от отрицательных к положительным), сопровождающейся узкой зоной высоких значений коэффициента вариации тренда ТЭСВ и p -значения.

Демонстрируется, что в ЗММ Северной Евразии к западу от меридиана 140° в.д. в течение двух последних десятилетий наблюдался отрицательный линейный тренд ТЭСВ, достигавший $-0,5 \text{ см}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{год}$, вызванный возрастанием мощности СТС под влиянием потепления климата, что является признаком деградации ЗММ. Исходя из этого, за последние два десятилетия дополнительный объём сезонно-талой воды на территории ЗММ Северной Евразии оценён как $\sim 2,7 \cdot 10^{11} \text{ т}$, часть которого в результате поверхностного стока поступила в Мировой океан. Верхняя оценка подъёма уровня Мирового океана за последние два десятилетия, вызванного деградацией ЗММ в Западной и Центральной Сибири за 2002–2024 гг., составила 0,7 мм, что пока не является основной причиной подъёма уровня Мирового океана.

К востоку от меридиана 140° в.д. в бассейне р. Колымы и на п-ове Чукотка за исследуемый период не выявлено однозначной и достоверной связи линейного тренда ТЭСВ с температурой ПП. Поэтому для восточных территорий Сибири требуется проведение более продолжительного спутникового мониторинга изменений поля силы тяжести Земли в этом регионе.

Исследование проведено в рамках госбюджетных тем Минобрнауки: «Научные основы оценки здоровья экосистем Северо-Запада России и предупреждения угроз экологической безопасности» (шифр FFZF-2022-0011) и «Разработка методов мониторинга здоровья экосистем Северо-Запада России» (шифр FFZF-2023-0001).

Литература

1. Анисимов О. А., Кокорев В. А. Моделирование мощности сезонноталого слоя с учетом изменений климата и растительности: прогноз на середину XXI века и анализ неопределенностей // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 2. С. 3–10. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-2(3-10).
2. Василевская Л. Н., Стоцкунте Ю. В. Анализ многолетней изменчивости атмосферных осадков и высоты снежного покрова на Северо-Востоке России за 1966–2014 гг. // Ученые записки Казанского ун-та. Сер. естеств. науки. 2017. Т. 159. Кн. 4. С. 681–699.
3. Гельфан А. Н., Фролова Н. Л., Магрицкий Д. В. и др. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундам. и приклад. климатология. 2021. Т. 7. № 1. С. 36–79. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-1-36-79.
4. Горный В. И., Шилин Б. В., Ясинский Г. И. Тепловая аэрокосмическая съемка. М.: Недра, 1993. 128 с.
5. Достовалов Б. Н., Кудрявцев В. А. Общее мерзлотоведение. М.: Изд-во МГУ, 1967. 403 с.
6. Дроздов Д. С., Украинцева Н. Г., Царев А. М., Чекрыгина С. Н. Изменения температурного поля мерзлых пород и состояния геосистем на территории Уренгойского месторождения за последние 35 лет (1974–2008) // Криосфера Земли. 2010. Т. 14. № 1. С. 22–31.
7. Киселёв А. В., Муратова Н. Р., Горный В. И., Тронин А. А. Связь запасов продуктивной влаги в почве с полем силы тяжести Земли (по данным съемок спутниками GRACE) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 7–16.
8. Киселёв А. В., Горный В. И., Крицук С. Г. и др. Индикация опасных природных явлений вариациями гравитационного поля Земли (по данным спутниковых съемок системой GRACE) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 6. С. 13–28. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-13-28.
9. Матвеев Л. Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 874 с.
10. Arendt A. A., Luthcke S. B., Larsen C. F. et al. Validation of high-resolution GRACE mascon estimates of glacier mass changes in the St Elias Mountains, Alaska, USA, using aircraft laser altimetry // J. Glaciology. 2008. V. 54. No. 188. P. 778–787. <https://doi.org/10.3189/002214308787780067>.
11. Bibi S., Wang L., Li X. et al. Response of groundwater storage and recharge in the Qaidam Basin (Tibetan Plateau) to climate variations from 2002 to 2016 // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2019. V. 124. P. 9918–9934. <https://doi.org/10.1029/2019JD030411>.
12. Bjorkman A. D., Myers-Smith I. H., Elmendorf S. C. et al. Plant functional trait change across a warming tundra biome // Nature. 2018. V. 562. No. 7725. P. 57–62. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0563-7>.
13. Boergens E., Kvas A., Eicker A. et al. Uncertainties of GRACE based terrestrial water storage anomalies for arbitrary averaging regions // J. Geophysical Research: Solid Earth. 2022. V. 127. Article e2021JB022081. <https://doi.org/10.1029/2021JB022081>.
14. Dahle Ch., Murböck M., Flechtner F. et al. The GFZ GRACE RL06 monthly gravity field time series: Processing details and quality assessment // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 18. Article 2116. DOI: 10.3390/rs11182116.
15. Dobslaw H., Boergens E. GravIS terrestrial water storage anomaly level-3 products for GFZ GravIS RL06 (V. 0006). COST-G GravIS RL01 (V. 0005): Technical note. GFZ Helmholtz Centre for Geosciences, 2025. 6 p.
16. Gornyy V. I., Balun O. V., Kiselev A. V. et al. Multiyear variations of soil moisture availability in the East European Plain // Geography, Environment, Sustainability. 2023. V. 16. No. 4. P. 120–124. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2023-2811>.
17. Hamlington B. D., Bellas-Manley A., Willis J. K. et al. The rate of global sea level rise doubled during the past three decades // Communications Earth and Environment. 2024. V. 5. Article 601. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01761-5>.
18. Landerer F. W., Swenson S. C. Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates // Water Resources Research. 2012. V. 48. Article W04531. 11 p. DOI: 10.1029/2011WR011453.
19. Landerer F. W., Dickey J. O., Güntner A. Terrestrial water budget of the Eurasian pan-Arctic from GRACE satellite measurements during 2003–2009 // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2010. V. 115. Article D23115. DOI: 10.1029/2010JD014584.

20. Moholdt G., Wouters B., Gardner A. S. Recent mass changes of glaciers in the Russian High Arctic // *Geophysical Research Letters*. 2012. V. 39. Article L10502. DOI: 10.1029/2012GL051466.
21. Muskett R. R., Romanovsky V. E. Groundwater storage changes in arctic permafrost watersheds from GRACE and *in situ* measurements // *Environmental Research Letters*. 2009. V. 4. Article 045009. 8 p. DOI: 10.1088/1748-9326/4/4/045009.
22. Obu J., Westermann S., Bartsch A. et al. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale // *Earth-Science Reviews*. 2019. V. 193. P. 299–316. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023>.
23. Panet I., Pollitz F., Mikhailov V. et al. Upper mantle rheology from GRACE and GPS postseismic deformation after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2010. V. 11. No. 6. Article Q06008. DOI: 10.1029/2009GC002905.
24. Romanovsky V. E., Drozdov D. S., Oberman N. G. et al. Thermal state of permafrost in Russia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2010. V. 21. P. 136–155. DOI: 10.1002/ppp.683.
25. Steffen H., Gitlein O., Denker H. et al. Present rate of uplift in Fennoscandia from GRACE and absolute gravimetry // *Tectonophysics*. 2009. V. 474. P. 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.01.012>.
26. Swenson S., Wahr J. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data // *Geophysical Research Letters*. 2006. V. 33. Article L08402. DOI: 10.1029/2005GL025285.
27. Tapley B. D., Bettadpur S., Watkins M., Reigber C. The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission overview and early results // *Geophysical Research Letters*. 2004. V. 31. Article L09607. DOI: 10.1029/2004GL019920.
28. Velicogna I., Sutterley T. C., van den Broeke M. R. Regional acceleration in ice mass loss from Greenland and Antarctica using GRACE time-variable gravity data // *Geophysical Research Letters*. 2014. V. 41. P. 8130–8137. <https://doi.org/10.1002/2014GL061052>.
29. Vishwakarma B. D., Devaraju B., Sneeuw N. What is the spatial resolution of GRACE satellite products for hydrology? // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. No. 6. Article 852. DOI: 10.3390/rs10060852.

Changes in the Earth's gravitational field are an indicator of degradation of the permafrost zone

A. V. Kiselev, V. I. Gornyy, A. A. Tronin

Saint Petersburg Federal Research Center RAS, Saint Petersburg 199178, Russia
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

The study aims to develop satellite monitoring of permafrost conditions and test the hypothesis that there is a decrease in the gravitational field of the Earth in areas where permafrost is melting due to global warming. The hypothesis is based on the idea that when permafrost melts, the seasonal thaw layer becomes deeper, and more water enters the ocean. This should lead to a reduction in the gravitational force of the Earth. Satellite variational gravimetry has been chosen as the main method for remote sensing. Gravity Recovery And Climate Experiment (GRACE) satellites have been used for long-term monitoring over the past two decades. Analysis of the results was based on data from borehole observations of permafrost and satellite imagery of land surface temperature, vegetation, and precipitation trends, as well as on digital maps of these trends compiled over a long period. These data came from the Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) network and satellite imagery. It was demonstrated that the results of satellite gravimetry measurements reflect the changes in the depth of the seasonal thaw layer, confirming the proposed hypothesis. The spatio-temporal characteristics of the long-term linear trend in gravity field variations within the permafrost region in Northern Eurasia were identified. On the basis of satellite imagery data over the past two decades, we can reliably conclude that the process of permafrost degradation is occurring in the Northern Eurasia west of the 140th meridian. To date, no significant signs of permafrost degradation have been observed east of this meridian. It is suggested that the process of permafrost degradation in the Kolyma River basin and on the Chukotka Peninsula is in its early stages, and longer-term monitoring is needed for more reliable satellite mapping of this process. A reliable regression relationship has been found between the sum of active temperatures of the underlying surface in the Northern Eurasian permafrost zone and the thickness of the effective moisture layer in September, as calculated using GRACE satellite data.

As a result, over the past two decades, the upper estimate of sea level rise due to additional meltwater influx from this area has not exceeded 0.7 millimeters. The relevance of this study is determined by the potential threat of building and linear construction deformations due to permafrost degradation in the context of climate change.

Keywords: climate warming, Eurasia, permafrost, satellites, Earth's surface, gravity field, temperature, vegetation index, trends, seasonal thawing layer, permafrost degradation

Accepted: 28.10.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-123-139

References

1. Anisimov O. A., Kokorev V. A., Russian permafrost in the 21st century: Model-based projections and analysis of uncertainties, *Earth's Cryosphere*, 2017, V. 21, No. 2, pp. 3–10 (in Russian), DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-2(3-10).
2. Vasilevskaya L. N., Stochkute Yu. V., Analysis of the long-term variations in precipitation and snow depth in the Northeast of Russia during the period of 1966–2014, *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Ser. Estestvennye nauki*, 2017, V. 159, Iss. 4, pp. 681–699 (in Russian).
3. Gelfan A., Frolova N., Magritsky D. et al., Climate change impact on annual and maximum runoff of Russian rivers: diagnosis and projections, *Fundamental and Applied Climatology*, 2021, V. 7, No. 1, pp. 36–79 (in Russian), DOI: 10.21513/2410-8758-2021-1-36-79.
4. Gornyy V. I., Shilin B. V., Yasinskii G. I., *Teplovaya aehrokosmicheskaya s'emka* (Infrared thermal airborne and satellite-flown imagery), Moscow: Nedra, 1993, 128 p. (in Russian).
5. Dostovalov B. N., Kudryavtsev V. A., *Obshchee merzlotovedenie* (Permafrost science), Moscow: Izd. MGU, 1967, 403 p. (in Russian).
6. Drozdov D. S., Ukraintseva N. G., Tsarev A. M., Chekrygina S. N., Changes of permafrost temperature rocks and geosystems state on the Urengoy oil-gas-field territory during the last 35 years (1974–2008), *Earth's Cryosphere*, 2010, V. 14, No. 1, pp. 22–31 (in Russian).
7. Kiselev A. V., Muratova N. R., Gornyy V. I., Tronin A. A., Relation between available water content in soil and gravity force (from GRACE data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, V. 12, No. 6, pp. 7–16 (in Russian).
8. Kiselev A. V., Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Tronin A. A., Indication of natural hazards using terrestrial gravity field variations observed by GRACE system, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, V. 13, No. 6, pp. 13–28 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-13-28.
9. Matveev L. T., *Osnovy obshchei meteorologii. Fizika atmosfery* (Fundamentals of general meteorology. Physics of the atmosphere), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1965, 874 p. (in Russian).
10. Arendt A. A., Luthcke S. B., Larsen C. F. et al., Validation of high-resolution GRACE mascon estimates of glacier mass changes in the St Elias Mountains, Alaska, USA, using aircraft laser altimetry, *J. Glaciology*, 2008, V. 54, No. 188, pp. 778–787, <https://doi.org/10.3189/002214308787780067>.
11. Bibi S., Wang L., Li X. et al., Response of groundwater storage and recharge in the Qaidam Basin (Tibetan Plateau) to climate variations from 2002 to 2016, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, V. 124, pp. 9918–9934, <https://doi.org/10.1029/2019JD030411>.
12. Bjorkman A. D., Myers-Smith I. H., Elmendorf S. C. et al., Plant functional trait change across a warming tundra biome, *Nature*, 2018, V. 562, No. 7725, pp. 57–62, <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0563-7>.
13. Boergens E., Kvas A., Eicker A. et al., Uncertainties of GRACE based terrestrial water storage anomalies for arbitrary averaging regions, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, V. 127, Article e2021JB022081, <https://doi.org/10.1029/2021JB022081>.
14. Dahle Ch., Murböck M., Flechtner F. et al., The GFZ GRACE RL06 monthly gravity field time series: Processing details and quality assessment, *Remote Sensing*, 2019, V. 11, No. 18, Article 2116, DOI: 10.3390/rs11182116.
15. Dobslaw H., Boergens E., *GravIS terrestrial water storage anomaly level-3 products for GFZ GravIS RL06 (V. 0006). COST-G GravIS RL01 (V. 0005), Technical note*, GFZ Helmholtz Centre for Geosciences, 2025, 6 p.
16. Gornyy V. I., Balun O. V., Kiselev A. V. et al., Multiyear variations of soil moisture availability in the East European Plain, *Geography, Environment, Sustainability*, 2023, V. 16, No. 4, pp. 120–124, <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2023-2811>.

17. Hamlington B. D., Bellas-Manley A., Willis J. K. et al., The rate of global sea level rise doubled during the past three decades, *Communications Earth and Environment*, 2024, V. 5, Article 601. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01761-5>.
18. Landerer F. W., Swenson S. C., Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates, *Water Resources Research*, 2012, V. 48, Article W04531, 11 p., DOI: 10.1029/2011WR011453.
19. Landerer F. W., Dickey J. O., Güntner A., Terrestrial water budget of the Eurasian pan-Arctic from GRACE satellite measurements during 2003–2009, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, V. 115, Article D23115, DOI: 10.1029/2010JD014584.
20. Moholdt G., Wouters B., Gardner A. S., Recent mass changes of glaciers in the Russian High Arctic, *Geophysical Research Letters*, 2012, V. 39, Article L10502, DOI: 10.1029/2012GL051466.
21. Muskett R. R., Romanovsky V. E., Groundwater storage changes in arctic permafrost watersheds from GRACE and *in situ* measurements, *Environmental Research Letters*, 2009, V. 4, Article 045009, 8 p., DOI: 10.1088/1748-9326/4/4/045009.
22. Obu J., Westermann S., Bartsch A. et al., Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale, *Earth-Science Reviews*, 2019, V. 193, pp. 299–316, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023>.
23. Panet I., Pollitz F., Mikhailov V. et al., Upper mantle rheology from GRACE and GPS postseismic deformation after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, V. 11, No. 6, Article Q06008, DOI: 10.1029/2009GC002905.
24. Romanovsky V. E., Drozdov D. S., Oberman N. G. et al., Thermal state of permafrost in Russia, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2010, V. 21, pp. 136–155, DOI: 10.1002/ppp.683.
25. Steffen H., Gitlein O., Denker H. et al., Present rate of uplift in Fennoscandia from GRACE and absolute gravimetry, *Tectonophysics*, 2009, V. 474, pp. 69–77, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.01.012>.
26. Swenson S. C., Wahr J., Post-processing removal of correlated errors in GRACE data, *Geophysical Research Letters*, 2006, V. 33, Article L08402, DOI: 10.1029/2005GL025285.
27. Tapley B. D., Bettadpur S., Watkins M., Reigber C., The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission overview and early results, *Geophysical Research Letters*, 2004, V. 31, Article L09607, DOI: 10.1029/2004GL019920.
28. Velicogna I., Sutterley T. C., van den Broeke M. R., Regional acceleration in ice mass loss from Greenland and Antarctica using GRACE time-variable gravity data, *Geophysical Research Letters*, 2014, V. 41, pp. 8130–8137, <https://doi.org/10.1002/2014GL061052>.
29. Vishwakarma B. D., Devaraju B., Sneeuw N., What is the spatial resolution of GRACE satellite products for hydrology?, *Remote Sensing*, 2018, V. 10, No. 6, Article 852, DOI: 10.3390/rs10060852.