

УДК 911.5:[551.5 + 551.34] (571.651)

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2020-2(143-152)

О.Д. ТРЕГУБОВ, К.К. УЯГАНСКИЙ, М.А. НУТЕВЕКЕТ

Анадырское обособленное подразделение Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского института им. Н.А. Шило ДВО РАН, 689000, Анадырь, ул. Энергетиков, 15, Россия, tregubov2@yandex.ru, uyagansky@yandex.ru, marin_art95@mail.ru

МОНИТОРИНГ МЕРЗЛОТНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ АНАДЫРСКОЙ НИЗМЕННОСТИ

Проанализированы изменения мерзлотно-климатических условий Анадырской низменности Чукотки на рубеже XX–XXI вв. Дана статистическая оценка трендов увеличения температуры воздуха и количества осадков. Обобщены результаты мониторинга слоя сезонного протаивания в типичных мерзлотно-климатических ландшафтах Анадырской низменности на площадках 100 × 100 м в рамках программы Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM). Рассмотрена динамика мощности и температуры деятельного слоя во взаимосвязи с погодой и климатом в период 1994–2017 гг. При увеличении в XXI в. среднемноголетних значений среднегодовой температуры воздуха на 1,1 °С (14 %) и годовой суммы осадков на 102 мм (31 %) вариации температуры достигли 17 %, осадков — 27 %. Это соответствует средней и значительной степени рассеяния данных. Увеличение продолжительности теплого периода года составило 4 сут (3 %) при вариации значений 7 %. Отмечено, что межгодовые флуктуации температуры воздуха определяют короткие колебания (3–5 лет) температуры и мощности сезонноталого слоя. Рост продолжительности теплого периода года влияет на долгосрочные изменения сезонного протаивания. Сделан вывод о том, что изменения мерзлотно-климатических условий Анадырской низменности не превышают критических величин вековых циклов колебаний температуры и мощности сезонноталого слоя приморских субарктических тундр. Опасными, вызывающими активизацию экзогенно-криогенных процессов, признаны 10-летние колебания глубины сезонного протаивания. Амплитуда этих колебаний достигает 15–25 % от среднемноголетних значений мощности сезонноталого слоя. Результаты мониторинга подтверждают прогнозы советских геофизиологов о вековых колебаниях климата и потеплении Восточной Субарктики в период с 1980–1990 по 2030–2040 гг.

Ключевые слова: криолитозона, деятельный слой, глобальное потепление, температура воздуха, сезонное протаивание.

O.D. TREGUBOV, K.K. UYAGANSKII, M.A. NUTEVEKET

Anadyr Autonomous Subdivision, Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, 689000, Anadyr, ul. Energetikov, 15, Russia, tregubov2@yandex.ru, uyagansky@yandex.ru, marin_art95@mail.ru

MONITORING OF PERMAFROST AND CLIMATE CONDITIONS OF THE ANADYR LOWLAND

The permafrost and climate conditions of the Anadyr lowland (Chukotka) for the late 20th – early 21st centuries are examined. A statistical estimate is made of the trends for an increase in air temperature and precipitation amounts. We summarized the monitoring results on the layer of seasonal thawing in typical permafrost landscapes of the Anadyr lowland in 100 × 100 m areas within the Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program. The dynamics of active layer thickness and temperature is considered in correlation with weather and climate during 1994–2017. With an increase of the mean long-term values of mean annual air temperature by 1.1 °C (14 %) and of the annual precipitation amount by 102 mm (31 %), the temperature and precipitation variations reached 17 and 27 %, respectively. This corresponds to a medium and significant degree of dispersion of data. An increase in the length of a warm period of a year was by 4 days (3 %), with a variation of the values making up 7 %. It is pointed out that interannual fluctuations are responsible for short fluctuations (3–5 years) in temperature and thickness of the seasonally thawed layer. An increase in the length of a warm period of a year has influence on long-term changes in seasonal thawing. It is concluded that changes in permafrost and climate conditions of the Anadyr lowland do not exceed critical values of secular cycles of temperature fluctuations and the thickness of the seasonally thawed layer in coastal subarctic tundras. Hazardous are the Decadal fluctuations in the depth of seasonal thawing are recognized as hazardous and as causing exogenous cryogenic processes. The amplitude of these fluctuations reaches 15–25 % of the mean long-term values of the thickness of the seasonally thawed layer. Monitoring results confirm predictions of soviet geocryologists concerning secular climatic fluctuations and warming in the Eastern Subarctic from 1980–1990 to 2030–2040.

Keywords: permafrost zone, active layer, global warming, air temperature, seasonal thawing.

ВВЕДЕНИЕ

Сфера использования термина «мониторинг» чрезвычайно широка. В науках о Земле под мониторингом подразумевают систему сбора, накопления, хранения и анализа данных, характеризующих долгосрочные изменения объектов и явлений, а также систематизированные во времени и пространстве наблюдения параметров состояния объектов или интенсивности процессов [1, 2]. Всем этим требованиям отвечает программа CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring), которая объединила исследователей из стран Евразии и Северной Америки, занятых проблемами изменений климата и деятельного слоя многолетней мерзлоты (Active Layer Permafrost) [3, 4]. Начало мониторинга глубины сезонного протаивания и температуры деятельного слоя приходится на 1993–1996 гг. Наблюдения по программе CALM планировались с целью оценки и прогнозирования скорости деградации циркумполярных ландшафтов в условиях глобального потепления климата [3–5]. Однако по мере накопления данных наблюдения стали источником разнообразной информации, характеризующей динамику сезонного протаивания, ее связи с флуктуациями климата, микрорельефом, почвенно-растительным покровом и криогенными процессами [6–11].

Настоящая работа посвящена итогам 25-летнего мониторинга сезонноталого слоя (СТС) на площадках CALM, расположенных в Анадырской низменности Чукотского автономного округа. Цель работы — проанализировать многолетние и межгодовые изменения мерзлотно-климатических условий по данным долговременных наблюдений метеорологических параметров и динамики сезонного протаивания в мерзлотных ландшафтах.

ОБЪЕКТЫ МОНИТОРИНГА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

На физико-географических картах, в атласах и описаниях природы Чукотки Анадырская низменность характеризуется как низменная равнина, окружающая анадырский эстуарий, нижнее течение рек Великой и Канчалана [12, 13]. Рельеф низменности представляет собой чередование невысоких тундровых увалов с абсолютными отметками высот 30–60 м и озерно-болотных котловин с меандрирующими тундровыми речками и термокарстовыми озерами. Единичные горные образования, сложенные вулканогенными породами кайнозоя (абс. выс. 100–300 м, единично — 600 м), рассредоточены по периметру горного обрамления низменности. Общая площадь этой территории около 35 тыс. км².

С позиций климатического районирования Анадырская низменность расположена на рубежах морского и умеренного континентального субарктического климата [14, 15]. В 350 км к северу от низменности проходит южная граница морского арктического климата. С точки зрения природного районирования территория низменности относится к подзоне южных кустарниковых тундр — ольхотундр [12, 16].

Анадырская низменность практически полностью находится в пределах зоны сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП). Мощность ММП изменяется от 300 до 100 м, температура на глубине нулевых амплитуд сезонных колебаний варьирует от –7,5 до –1 °С [12, 13]. Лишь на юге, в подножьях Корякского нагорья, с утончением толщи мерзлых пород до 80–50 м сплошная мерзлота сменяется прерывистой [17]. Сквозные таликовые зоны приурочены к руслам рек Анадыря, Великой, Канчалана. Существенное распространение в пределах Анадырской низменности имеют надмерзлотные озерные талики мощностью в первые десятки метров. Для большей части территории низменности характерен мелкий тип сезонного протаивания глубиной от 40 до 70 см.

Выбор Анадырской низменности в рамках программы CALM в качестве объекта мониторинга сезонного протаивания и как индикатора глобального потепления климата обусловлен несколькими причинами: крайнее южное положение тундровых ландшафтов вкупе с близостью Тихого океана; широкое распространение климаксовых кочкарных кустарничковых мохово-пушицевых тундр; мелкий тип сезонного протаивания. Мониторинг был начат в 1994 г. на площадке «Онемен», представляющей собой фрагмент кочкарной кустарничковой мохово-пушицевой тундры на вершине и пологих склонах типичного для низменности увала высотой 26 м, расположенного в непосредственной близости от мыса Глубокого, на северном берегу залива Онемен [18, 19].

Очевидно, что одной площадки для обеспечения репрезентативности наблюдений недостаточно. Восточная Сибирь в целом и крайний Северо-Восток преимущественно горная страна, поэтому изменения климата ретранслируются на низменность, в том числе через горные склоны и вершины. В 1996 г. вторая площадка мониторинга была разбита у подножия горы Дионисий (абс. выс. 577 м) в

пределах сложного урочища, состоящего из нескольких фаций. Это бугорковые и крупнокочкарные кустарничковые мохово-пушицевые тундры, ивовые осоково-сфагновые тундроболота, осоковые травяные речки.

Мониторинг мощности СТС проводился по методике CALM [3, 4, 9, 19]. На площадках 100 × 100 м с помощью мерной ленты длиной 100 м определялось местонахождение узловых точек сети 10 × 10 м, в которых путем продавливания металлическим щупом длиной 1,2 м измерялась глубина сезонного протаивания. Наблюдения проводились ежегодно с 25 августа по 5 сентября. Результаты представлялись средним значением 121 измерения.

Автоматизированные измерения температуры деятельного слоя проводились с интервалом 4 ч круглогодично. Для записи температуры использованы регистраторы (loggers data) HOBO U12-008, U23-002 производителя Onset Computer Corporation (USA) с внешними датчиками температуры TMC50-ND. Термодатчики устанавливались на глубинах 10–15, 25–30, 45–50 и 100 см.

Данные наблюдений аккумулируются на сайте Geography Department of George Washington University и находятся в открытом доступе (<http://www.gwu.edu/~calm/data/>). Обработка и анализ материалов по динамике параметров климата проводились с использованием данных суточных наблюдений погоды на метеостанции Анадырь (<http://meteocenter.net/>).

При статистико-математической обработке данных использовались стандартные инструменты Microsoft Excel, в том числе при проведении регрессионного анализа для оценки линейного тренда временных рядов применялся коэффициент детерминации (R^2). Для приемлемых моделей предполагается, что R^2 должен быть не меньше 0,5. Модели с коэффициентом детерминации $R^2 > 0,8$ признают функциональными.

МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ И ДИНАМИКА КЛИМАТА

Продолжительный период метеорологических наблюдений на метеостанции Анадырь позволяет проанализировать изменения климатических условий Анадырской низменности. В табл. 1 приведены величины некоторых климатических характеристик XX и XXI вв. с указанием периода наблюдений. Используются данные климатического справочника Северо-Востока СССР (1898–1958 гг.), которые до настоящего времени применяются в различных схемах природно-климатического районирования

Таблица 1

Сравнительный анализ параметров климата по данным метеостанции Анадырь

Климатический параметр	XX в.		XX–XXI вв.		Изменение
	справочные данные, по [14]	период наблюдения, годы	расчетные данные	период наблюдения, годы	
Температура воздуха, °С:		41 год		41 год	
средняя за год	–7,7	(1898–1913, 1915–1919, 1926–1948)	–6,6	(1975–2016)	+1,1
зимняя (октябрь–апрель)	–15,2		–16,3		–1,1
летняя (май–сентябрь)	7,2		7,5		+0,3
средний минимум (январь–февраль)	–22,2		–22,5		–0,3
средний максимум (июнь)	10,5		11,6		+1,1
Продолжительность периода с температурой выше 0 °С	128	35 лет (1900–1903, 1905–1909, 1913–1919, 1926–1948)	132	35 лет (1981–2016)	+4
Среднее количество осадков за год, мм:		21 год		22 года	
твердых	312	(1937–1958)	414	(1994–2016)	+102
жидких	180		262		+82
жидких	132		152		+20
Дата появления устойчивого снежного покрова	17 октября	23 года (1898–1909, 1936–1948)	17 октября	23 года (1994–2017)	0
Средняя из наибольших высота снежного покрова, см	25	13 лет (1945–1958)	27	13 лет (1999–2012)	+2
Скорость ветра, м/с	6,7	20 лет (1927–1947)	6,6	20 лет (1992–2012)	–0,1

Якутии, Колымы, Чукотки и Камчатки [14, 15], а также представлены результаты обработки среднесуточных данных наблюдений Чукотского УГМС (1975–2017 гг.).

В абсолютных и относительных цифрах изменения климата существенно затронули среднегодовое количество осадков и среднегодовую температуру (см. табл. 1). При этом количество твердых осадков выросло на 82 мм (45 %), жидких — на 20 мм (15 %). Рост среднегодовой температуры произошел на фоне снижения температуры холодного периода на 1,1 °С (7 %) и увеличения средней температуры теплого периода на 0,3 °С (4 %). Параметры снежного покрова, скорости ветра остались без изменений. В целом это соответствует широко обсуждаемым в научных кругах тенденциям общего потепления климата Арктики и Субарктики.

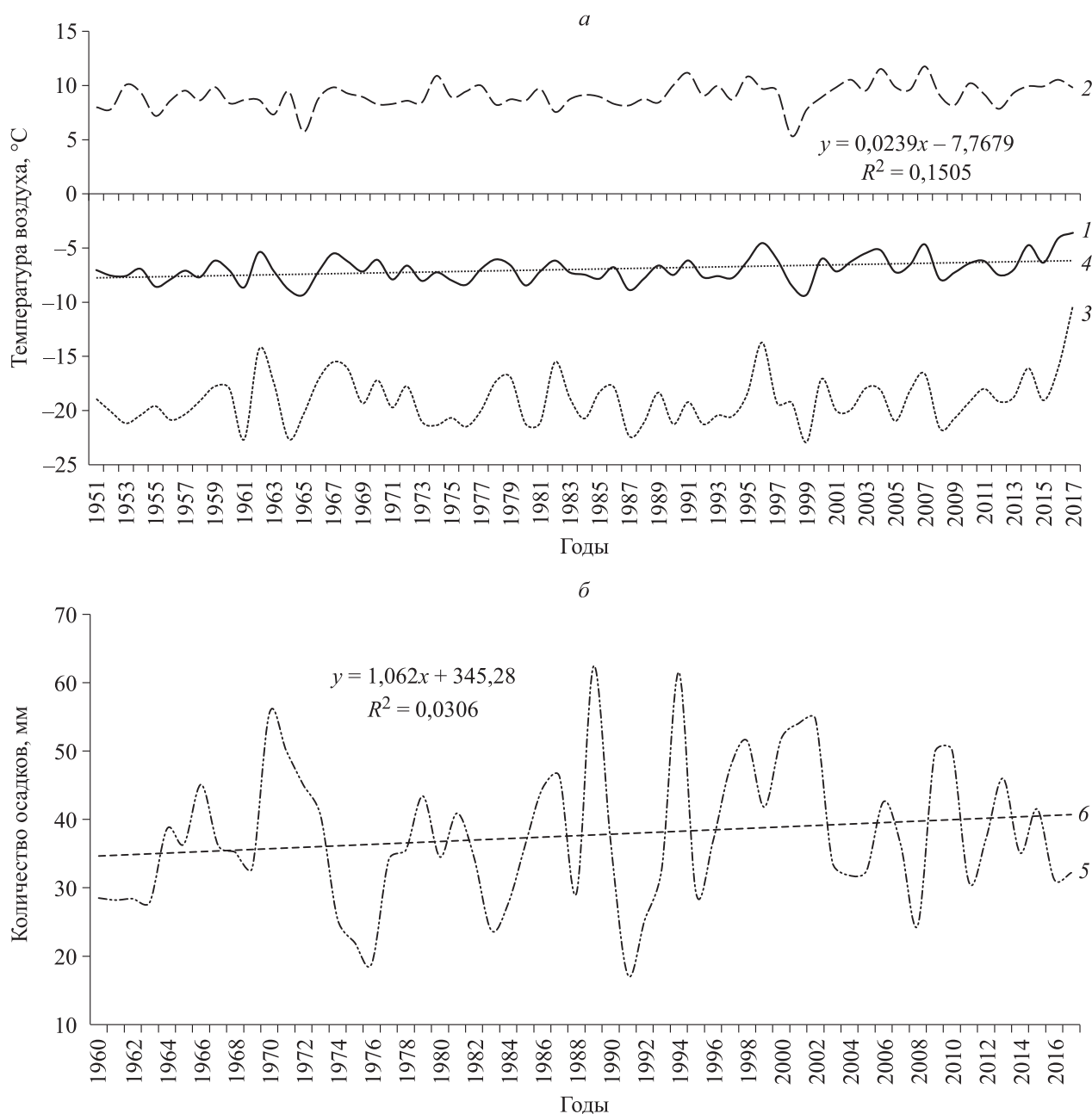


Рис. 1. Динамика температуры воздуха и суммы осадков по данным метеостанции Анадырь (по данным непрерывных наблюдений количества осадков с 1960 г.).

Температура воздуха (а): 1 — среднегодовая, 2 — среднелетняя, 3 — среднезимняя; 4 — линейный тренд среднегодовой температуры. Осадки (б): 5 — сумма осадков, 6 — линейный тренд суммы осадков за год.

Для того чтобы понять, насколько справедливы такие выводы для Анадырской низменности, рассмотрим динамику фактических наблюдений погоды в непрерывном ряду от середины прошлого века до 2017 г. Согласно линейному тренду, среднегодовая температура за период 1951–2017 гг. при стандартном отклонении 1,2 °С и коэффициенте вариации 17 % выросла на 1,81 °С (рис. 1, а). Достоверность линейного тренда невелика: $R^2 = 0,1505$. Вариация температур обусловлена разноамплитудными колебаниями с периодами 3–5 лет, которые можно увидеть на графиках. Следует отметить, что подобные межгодовые вариации температур обычны для метеорологических величин. Короткие колебания рассматриваются метеорологами как статистический шум и фильтруются 5-летним окном осреднения [20, 21].

Еще сложнее ситуация с оценкой достоверности увеличения количества осадков. Коэффициент вариации годового количества осадков 27,2 % соответствует значительной степени рассеяния данных выборки (для сравнения: коэффициент вариации температуры 17 % отвечает средней степени рассеяния) [22]. При стандартном отклонении 102,5 мм увеличение осадков по линейному тренду за 57 лет составляет 61,6 мм (см. рис. 1, б). Назвать подобные «всплески» с размахом более 100 % от линейного роста «случайным шумом» затруднительно. Коэффициент детерминации линейной модели увеличения количества осадков — 0,0306.

ТРЕНДЫ И ДИНАМИКА СЕЗОННОГО ПРОТАИВАНИЯ

Наблюдения мерзлотных условий ландшафтов Анадырской низменности были начаты в 1935 г. на Анадырской научно-исследовательской мерзлотной станции и обобщены в 1988 г. в работе [13]. Исследования сезонного протаивания были ориентированы на изучение пространственной и генетической динамики СТС — широтной, геоморфологической, литологической и почвенно-растительной. Временная составляющая учитывалась мало. Так, по заключению авторов [13], на пологих заболоченных склонах низменности с полигональными кочкарными и бугорковатыми кустарничковыми мохово-пушицевыми тундрами на торфяном субстрате мощность СТС изменяется в пределах 0,4–0,5 м. Для склонов и террас с грубодисперсным основанием и маломощным (0,2–0,3 м) почвенно-растительным покровом приводится размах мощности СТС 1–1,5 м [12, 13].

Анализ изменения геоэкологических условий в связи с динамикой климата приведен в [13] для всей Восточной Сибири. В основу анализа положена известная связь изменений среднегодовой температуры воздуха с температурой почв и глубиной сезонного протаивания, с одной стороны, и отепляющим влиянием на температуру поверхности мерзлых грунтов снежного покрова — с другой [23]. Анализировался период метеорологических наблюдений с 1890 по 1980 г. С.Ю. Пармузин и С.Ф. Хруцкий сделали выводы о плавном синусоидальном изменении климатических условий с длиной периода 90–100 лет для четырех широтных зон Восточной Сибири [13]. Максимум потепления характеризуется широтным смещением с севера на юг: для 65-й параллели (Анадырская низменность) он приходится на 1940-е гг. В 1980–1990-е гг. исследователями прогнозировался максимум похолодания, который должен смениться очередным полувековым ростом температуры воздуха и кровли мерзлоты с максимумом в 2030–2040-е гг. К этому следует добавить, что авторы не учитывали естественную динамику почвенно-растительного покрова, которая в условиях вековых климатических циклов способна оказывать стабилизирующее воздействие на сезонное протаивание [23–25].

Рассмотреть, каким образом современные флуктуации климата влияют на глубину сезонного протаивания, позволяют результаты мониторинга 1994–2017 гг. (рис. 2). Прежде всего следует отметить, что тренд роста глубины сезонного протаивания отличается существенно большей достоверностью в сравнении с температурой воздуха и количеством осадков (площадка «Онемен», $R^2 = 0,57$). Для площадок «Онемен» и «Дионисий» увеличение мощности по линейному тренду составляет 12–14 см, или 30 %. При этом стандартное отклонение изменяется в пределах 6,3–6,7 см, а коэффициент вариации сезонного протаивания не превышает 12 %. В то же время на графиках сезонного протаивания отчетливо видны синхронные с температурой воздуха 3–5-летние колебания и фиксируется как минимум один 10-летний цикл — 2006–2016 гг. (см. рис. 2).

Статистические оценки связей сезонного протаивания с климатическими параметрами указали на температуру воздуха и продолжительность теплого периода года (положительные среднесуточные температуры воздуха), коэффициенты корреляции — 0,55–0,58 и 0,72–0,66 соответственно. Коэффициент корреляции на 5 %-м уровне значимости — 0,423. Корреляция количества осадков с глубиной протаивания отрицательна и малозначима.

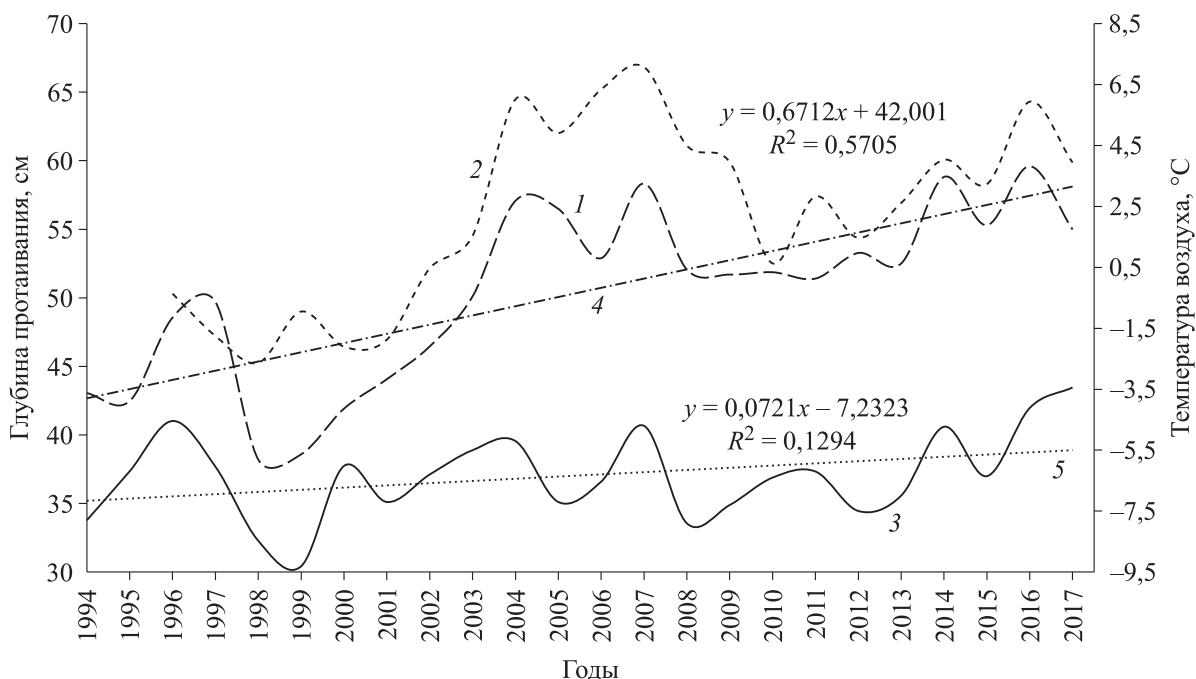


Рис. 2. Динамика сезонного протаивания и среднегодовой температуры воздуха на площадках CALM.

1 — сезонноталый слой (площадка «Онемен»); 2 — сезонноталый слой (площадка «Дионисий»); 3 — среднегодовая температура воздуха; 4 — линейный тренд (сезонноталый слой, площадка «Онемен»); 5 — линейный тренд (температура воздуха).

Динамика продолжительности теплого периода за 1994–2017 гг. удовлетворительно аппроксимируется линейным трендом с $R^2 = 0,44$:

$$y = 0,91x + 121,8.$$

Увеличение продолжительности теплого периода составило 22 дня, или 17 %, при стандартном отклонении 9,4 сут — вариации 7 %. В отличие от температуры воздуха и количества осадков, короткие колебания продолжительности теплого периода (3–5 лет) выражены слабо, зато контрастны положительные экстремумы 9–12-летней периодичности: 1997, 2005, 2017 гг. Эти экстремумы, синхронные с увеличением глубины сезонного протаивания, вероятно, и обеспечивают высокую коррелированность продолжительности теплого периода с мощностью СТС.

Таким образом, по данным мониторинга, современная динамика СТС характеризуется разнопериодными колебаниями мощности с общим ее увеличением в пределах, не превышающих диапазон мелкого типа сезонного протаивания (0,5–0,7 м) [26]. Роста активности криогенных процессов в пределах площадок не отмечено. Активизация термоэрозии и термоабразии зафиксирована по берегам Анадырского лимана в экстремумы 10-летних колебаний (1994–1997, 2004–2007, 2014–2016 гг.).

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ СЕЗОННОТАЛОГО СЛОЯ

Возможность непрерывных инструментальных полевых измерений (с интервалом до нескольких минут) и записи (сохранения в памяти до 40 тыс. значений) температуры появилась сравнительно недавно — в конце XX в. Ряды практически непрерывных измерений результативны для изучения внутрисезонного изменения температуры и теплооборотов СТС, послынного сравнительного анализа среднесезонных и среднегодовых температур профилей почв различных мерзлотных ландшафтов [26, 27]. Работы, посвященные долгосрочным непрерывным наблюдениям изменения температуры СТС, редки.

Автоматизированные наблюдения температуры кровли ММП Анадырской низменности начаты в 1996 г. За 20-летний период температура различных горизонтов СТС на площадке «Дионисий» фиксировалась в течение 17 лет, на площадке «Онемен» — 15 лет. Среднегодовые температуры, рассчитанные для средней части протаивающего слоя (20–50 см) площадок «Дионисий» и «Онемен»,

Коэффициенты корреляции температуры СТС

Глубина измерений температуры, см	Среднегодовая температура воздуха, °С	Глубина протаивания, м
Площадка «Дионисий» (0,48)		
25–30	0,7	0,5
45–50	0,7	0,5
Площадка «Онемен» (0,51)		
25–30	0,8	0,5
45–50	0,6	0,7

Примечание. В скобках — критическое значение коэффициента корреляции на 5 %-м уровне значимости.

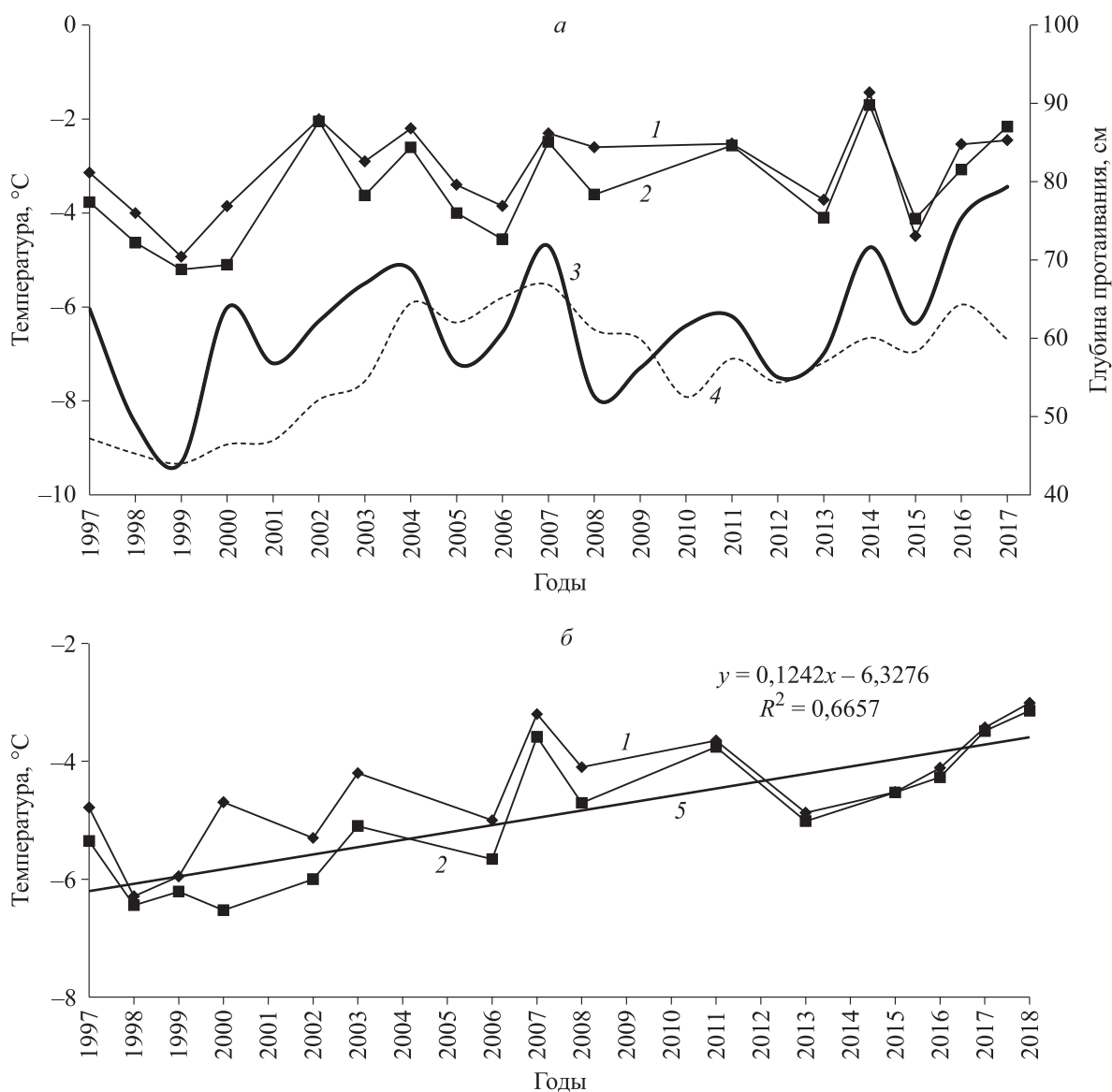


Рис. 3. Динамика среднегодовой температуры сезонноталого слоя.

a — площадка «Дионисий», *б* — площадка «Онемен». Среднегодовая температура сезонноталого слоя на глубине, см: 25–30 (1), 45–50 (2). 3 — среднегодовая температура воздуха; 4 — глубина протаивания; 5 — линейный тренд (среднегодовая температура сезонноталого слоя на глубине 45–50 см).

составили $-3,3$ и $-4,7$ °С соответственно. Разница температур СТС на этих площадках обусловлена их различиями в средней глубине сезонного протаивания и температуре кровли ММП: 60 см и $-3,6$ °С для площадки «Дионисий», 51 см и $-4,9$ °С для площадки «Онемен». Среднегодовая температура в верхней части разреза СТС и на глубине сезонного протаивания описываемых площадок понижается: до $-3,7$ и $-4,8$ °С на глубине 10–15 см и до $-3,8$ и -6 °С на глубине 95–100 см.

Информативность корреляции температуры СТС с параметрами климата и мощностью СТС ограничена малым числом наблюдений. Рассчитанные значения коэффициентов корреляции приведены в табл. 2. В то же время сходство графиков временных рядов среднегодовой температуры воздуха, среднегодовых температур СТС и глубины протаивания позволяет предположить, что между этими параметрами существует причинно-следственная связь (рис. 3, а).

Для площадки «Дионисий» достоверного увеличения температуры СТС не зафиксировано, стандартное отклонение $0,8-1$ °С, коэффициент вариации — 30 %. Аппроксимация рядов наблюдений температуры на глубинах 25–30 и 45–50 см линейными трендами показала коэффициент детерминации R^2 , равный 0,1022 и 0,2315 соответственно.

В отличие от площадки «Дионисий», на площадке «Онемен» линейный тренд роста температуры выражен достаточно четко: $R^2 = 0,6657$ (см. рис. 3, б). За 20-летний период температура СТС здесь увеличилась на $2,5$ °С при стандартном отклонении 1 °С и коэффициенте вариации 20 %. Различие площадок, по-видимому, стало следствием неодинаковой температуры ММП северного берега залива Онемен и южного подножия горы Дионисия. В условиях кочкарных кустарничковых мохово-пушицевых тундр с развитым органогенным горизонтом почв («Онемен») кровля ММП с температурой $-4,9$ °С оказывает на СТС существенное охлаждающее воздействие. С увеличением мощности СТС на площадке «Онемен» это воздействию снизилось на 30 %, уступив тепляющему влиянию климата. При равной пропорции увеличения глубины сезонного протаивания на площадке «Дионисий» аналогичного роста температуры СТС не произошло, в том числе по причине более высокой температуры кровли ММП ($-3,6$ °С). В условиях разреженного почвенно-растительного покрова, микроклимата южной экспозиции горного подножия на площадке «Дионисий» воздействие климатического фактора на температуру СТС сглаживается активно проявленной здесь криотурбацией в виде многочисленных пятен медальонов. К концу наблюдаемого периода произошло выравнивание температур двух площадок с изначально разными температурами (см. рис. 3).

ВЫВОДЫ

По результатам мониторинга мерзлотно-климатических условий Анадырской низменности можно отметить следующее.

1. Однозначные выводы о наличии и долгосрочности тренда изменения климата Анадырской низменности по метеорологическим данным сделать нельзя. Наблюдаемые метеорологические параметры характеризуются несинхронными разнопериодными и разноамплитудными колебаниями. Есть достаточные основания считать справедливыми выводы геокриологов 1990-х гг. о наличии плавных вековых синусоидальных изменений климата Северо-Востока Евразии с периодом 90–100 лет. Тем самым повышение температуры воздуха за 1951–2017 гг. на $1,8$ °С можно рассматривать как часть спрогнозированного ранее потепления до 2030–2040 гг.

2. Увеличение сезонного протаивания в 1994–2017 гг. составило 12–14 см (30 %) при вариации 12 %. Вариация глубины сезонного протаивания во многом обусловлена колебаниями 10-летнего цикла: 8 см в 1996–1997 гг., 10–12 см в 2003–2007 гг., 7–9 см в 2014–2016 гг. Главный фактор увеличения глубины сезонного протаивания в Анадырской низменности — рост продолжительности теплого периода года. Влияние повышения температуры воздуха в большей мере проявляется в краткосрочном увеличении сезонного протаивания в аномально теплые летние периоды (3–5 лет).

3. Степень и характер воздействия повышения температуры воздуха на температуру СТС определяется мерзлотными и ландшафтными условиями Анадырской низменности. Для динамичных ландшафтов склонов оно минимально, для климаксовых тундр вершин пологих увалов — максимально. На площадке «Дионисий» за период наблюдений увеличение температуры СТС не зафиксировано, на площадке «Онемен» оно составило $2,5$ °С. Изменение температур СТС в основном происходит за счет увеличения температуры средней части слоя (20–50 см). В динамичных ландшафтах повышение температуры СТС при увеличении его мощности нивелируется активизацией криотурбирования.

4. С позиций климатического и физико-географического районирования наблюдаемая динамика мерзлотно-климатических условий может рассматриваться как осцилляция (дрожание) природных границ различной периодичности. По данным наблюдений, она не превышает известных пределов ни по температуре, ни по глубине сезонного протаивания. Положительные экстремумы температуры воздуха, по данным метеонаблюдений Анадырской станции, образуют закономерный ряд, °С: 1937 г. — -4, 1950 — -3, 1996 — -4, 2004 — -5, 2007 — -5, 2014 — -4, 2017 г. — -3. В случае Анадырской низменности осцилляции осложняются треугольным северо-западным сопряжением областей континентального, морского субарктического и морского арктического климата. В результате колебания климатических и ландшафтных рубежей идут по схеме более сложной, чем схема «морской климат — континентальный климат». Увеличение глубины сезонного протаивания не сопровождается сокращением количества осадков, снижением среднегодовой температуры воздуха и увеличением ее межсезонной амплитуды.

5. Основная угроза деградации природных мерзлотных ландшафтов, расположенных в пределах Анадырской низменности, связана с резонансным совмещением краткосрочных потеплений периодичностью 3–5 и 8–12 лет [27]. Считаем, что вековые изменения мерзлотно-климатических условий периодичностью 25–30 и 80–90 лет не будут иметь катастрофических для природных территорий последствий. Иначе обстоит дело с инженерными сооружениями, на которые природные механизмы саморегуляции не распространяются. Здесь требуется оперативная корректировка строительных норм, которая бы учитывала как краткосрочную, так и долгосрочную динамику мерзлотно-климатических условий.

В заключение следует отметить любопытный факт регулярного повышения в засушливые годы (2004, 2007, 2016 гг.) температуры в торфяных буграх на глубине 10–15 см от поверхности на 10–15 °С выше температуры воздуха приземного слоя атмосферы (до 30–35 °С). Это может указывать на экзотермическую реакцию окисления органического горизонта почв и дополнительный источник тепла сезонного протаивания в аномально жаркие и сухие периоды.

Работа выполнена при финансовой поддержке международной программы CALM Circumpolar Active Layer Monitoring (NSF OPP-9732051 и OPP-0225603) и Российского фонда фундаментальных исследований (18-05-60036 и 20-55-53014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Прозоров Л.Л.** Энциклопедический словарь «Геоэкология». 2-е изд., доп. — М.: Научный мир, 2008. — 468 с.
2. **Реймерс Н.Ф.** Природопользование: Словарь-справочник. — М.: Мысль, 1990. — 637 с.
3. **Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E.** The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: Research designs and initial results // *Polar Geography*. — 2000. — Vol. 24, N 3. — P. 165–258.
4. **Nelson F.E., Shiklomanov N.I., Hinkel K., Christiansen H.** Introduction: the Circumpolar Active Layer Monitoring Network (CALM) workshop and CALM II program // *Polar Geography*. — 2004. — Vol. 28, N 4. — P. 253–266.
5. **Анисимов О.А., Анохин Ю.А., Лавров С.А., Малкова Г.В., Мяс Л.Т., Павлов А.В., Романовский В.А., Стрелецкий Д.А., Холодов А.Л., Шикломанов Н.И.** Континентальная многолетняя мерзлота // *Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем*. — М.: Изд-во Ин-та глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, 2012. — С. 301–359.
6. **Григорьевская А.В., Оленченко В.В., Шейн А.Н., Камнев Я.К.** Изучение глубины сезонного оттаивания на площадке циркумполярного мониторинга деятельного слоя // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. — 2017. — Т. 2, № 3. — С. 94–98.
7. **Mazhitova G., Malkova G., Chestnykh O., Zamolodchikov D.** Active-layer spatial and temporal variability at European Russian Circumpolar-Active-Layer-Monitoring (CALM) sites // *Permafrost and Periglacial Processes*. — 2004. — Vol. 15 (2). — P. 123–139.
8. **Трегубов О.Д.** Глобальное потепление как фактор изменения химических свойств мерзлотных тундровых почв // *Материалы III Междунар. науч. конф. «Современные проблемы загрязнения почв»* (Москва, 24–28 мая 2010 г.). — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2010. — С. 294–297.
9. **Мажитова Г.Г., Каверин Д.А.** Динамика глубины протаивания и осадки поверхности почвы на площадке CALM в 1996–2006 гг. (европейский Северо-Восток) // *Вестн. Ин-та биологии Коми науч. центра УрО РАН*. — 2007. — № 9 (119). — С. 17–20.
10. **Богородский П.В., Макштас А.П., Кустов В.Ю., Грубый А.С., Мовчан В.В.** Динамика сезонного протаивания вечной мерзлоты в районе гидрометеорологической обсерватории Тикси // *Проблемы Арктики и Антарктики*. — 2015. — № 4 (106). — С. 88–98.

11. **Маслаков А.А.** Изменение мерзлотных условий приморских равнин Восточной Чукотки под воздействием природных и антропогенных факторов: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2018. — 24 с.
12. **Чукотка: Природно-экономический очерк** / Авт.-сост. А.Н. Котов, В.А. Кононов, Н.П. Отке, А.Н. Пилясов, И.В. Поломошнов, С.В. Соколов, М.И. Тишин, В.Б. Шмакин, А.Г. Шумовский. — М.: Арт-Литэкс, 1995. — 370 с.
13. **Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток** / Под ред. Э.Д. Ершова. — М.: Недра, 1989. — 515 с.
14. **Прикладной климатологический справочник Северо-Востока СССР** / Под ред. Н.К. Клюкина. — Магадан: Магадан. кн. изд-во, 1960. — 433 с.
15. **Яньшин А.Б.** Гидрометеорологический очерк Чукотского автономного округа. Ч. 2: Побережье Берингова моря. — Владивосток: Изд-во Дальневост. науч.-исслед., проектно-изыскат. и конструкторско-технолог. ин-та морского флота, 1991. — 156 с.
16. **Трегубов О.Д.** Об устойчивости тундр к техногенному воздействию и глобальным изменениям среды // Вестн. ДВО РАН. — 2010. — № 4. — С. 79–89.
17. **Котов А.Н., Бражник С.Н., Маслов В.Я., Рябчун В.К.** Геокриологические условия Верхнетелекайского нефтегазоконденсатного месторождения (южная часть Нижнеанадырской впадины). — М.: ГЕОС, 1999. — 70 с.
18. **Котов А.Н., Бражник С.Н., Галанин А.В., Маслов В.Я., Самохвалов В.Л.** Организация экологического мониторинга на стационаре «Онемен» // Чукотка: природа и человек. — Магадан: Изд-во НИЦ «Чукотка» Северо-Вост. науч. центра ДВО РАН, 1998. — С. 93–111.
19. **Трегубов О.Д., Львов А.П.** Репрезентативность наблюдений глубины сезонной оттайки в тундровых ландшафтах // Вестн. Северо-Вост. федер. ун-та. — 2014. — Т. 11, № 5. — С. 89–99.
20. **Монин А.С.** Введение в теорию климата. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 248 с.
21. **Иванов В.В.** Периодические колебания погоды и климата // Успехи физических наук. — 2002. — Т. 172, № 7. — С. 777–811.
22. **Закс Л.** Статистическое оценивание / Пер. с нем. В.Н. Варьгина. — М.: Статистика, 1976. — 598 с.
23. **Общее мерзловедение** / Под ред. В.А. Кудрявцева. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. — 464 с.
24. **Тыртиков А.П.** Влияние растительного покрова на промерзание и протаивание грунтов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1969. — 192 с.
25. **Тумель Н.В., Зотова Л.И.** Геоэкология криолитозоны: Учеб. пособие. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2014. — 244 с.
26. **Мажитова Г.Г.** Температурные режимы почв в зоне несплошной многолетней мерзлоты европейского Северо-Востока России // Почвоведение. — 2008. — № 1. — С. 54–67.
27. **Трегубов О.Д.** Экологические угрозы катастрофической резонансной оттайки ММП в условиях флуктуаций климата (на примере Чукотки) // Материалы III Всерос. науч. конф. с междунар. участием «Экологический риск и экологическая безопасность». — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2012. — Т. 1. — С. 269–271.

Поступила в редакцию 09.10.2018

После доработки 25.11.2018

Принята к публикации 25.12.2019