

УДК 551.34:[551.5+911.5]

К ВОПРОСУ О ПРИРОДЕ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ ГЛУБИНЫ СЕЗОННОГО ПРОТАИВАНИЯ ТУНДРОВЫХ ПОЧВ

© 2019 г. О. Д. Трегубов

Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН
ул. Портовая, 16, Магадан, 685000 Россия
E-mail: tregubov2@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.02.2019 г.

Изучены ряды 20-летних наблюдений сезонного протаивания на площадках CALM¹ Евразии и Северной Америки. Рассмотрены короткопериодные 2-5-летние колебания мощности сезонноталого слоя (СТС). Отмечены сходства и различия сезонного протаивания тундровых почв в циркумполярных странах. На примере двух площадок мониторинга CALM в Чукотском автономном округе проанализирована динамика сезонного протаивания. С использованием математических методов описаны ряды вариаций мощности СТС, определены амплитуда, частоты и периоды колебаний. Сравнительный графический и статистический анализ флуктуаций климата и колебаний мощности СТС позволил уточнить характер и степень воздействия климатических факторов на протаивание почв. Сделан вывод о значительном влиянии на глубину сезонного протаивания продолжительности теплого периода года. Указано, что игнорирование внутривековых вариаций параметров климата и мерзлотных ландшафтов является причиной противоречивости суждений о тенденциях изменений климата и прогнозах деградации многолетней мерзлоты. По результатам анализа колебаний климата и сезонного протаивания предложено понятие “климатический год” как сопряжение погодных условий 2-3 лет, однотипно влияющих на глубину протаивания.

Отмечена возможность использования параметров вариаций сезонного протаивания для оценки устойчивости мерзлотных ландшафтов. Обосновано применение в качестве показателя устойчивости кровли многолетней мерзлоты отношения средних значений амплитуды к периоду коротких колебаний сезонного протаивания.

Предложена гипотеза влияния солнечного и техногенного электромагнитного излучения в радиоволновом диапазоне на деградацию подземных льдов подошвы сезонноталого слоя и сокращение арктических льдов.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, сезонноталый слой, CALM, мерзлотный ландшафт, колебания климата, солнечный цикл.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-7809201943-17>

ВВЕДЕНИЕ¹

Уже более полувека для геоэкологии остаются актуальными вопросы периодичности изменений состояния кровли многолетнемерзлых пород (ММП) – температуры, влажности и мощности сезонноталого слоя (СТС) [16, 28]. В центре внимания – климатические факторы, определяющие значения параметров сезонноталого слоя и их колебания [1, 15, 17]. Основные проблемы исследований связаны с пространственно-временной организацией внутриклиматических колебаний и с их влиянием на свойства СТС в различных

ландшафтах криолитозоны [5]. В числе причин, затрудняющих решение поставленных вопросов, чаще всего упоминают непродолжительность временных рядов системных наблюдений сезонного протаивания, а также воздействие на климат природных (вулканизм) и антропогенных (выброс парниковых газов) факторов [2, 28, 19, 20].

Недавно минул 20-летний срок непрерывных наблюдений СТС на площадках циркумполярного мониторинга международной программы исследований CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring: Long-Term Observations of the Climate-Active Layer-Permafrost System) [39, 40]. Измерения, выполняемые синхронно по единой методике и находящиеся в открытом доступе, все больше

¹ Международная программа исследований CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring: Long-Term Observations of the Climate-Active Layer-Permafrost System).

привлекают внимание исследователей криолитозоны [2, 8]. Очевидно, что двадцатилетние ряды наблюдений CALM позволяют проанализировать не только тренды изменений мощности и температуры СТС, но сделать выводы о 2-5, и предположения о 8-12-летних колебаниях глубины сезонного протаивания, что и является предметом настоящей работы.

ИЗУЧЕННОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Прежде всего следует отделить проблему короткопериодных колебаний от поисков трендов глобального потепления или похолодания. Немало исследователей климата и мерзлотных ландшафтов, наблюдавших текущие изменения климатических параметров, делали выводы о потеплении климата, его стабилизации или наступающем похолодании. Но по прошествии лет оказывалось, что эти тенденции являются составными частями цикла внутривековых изменений климатических и мерзлотных условий. Предостережение от возможных заблуждений подобного рода было сделано еще на заре мерзлотоведения [16]. Для того чтобы прогнозировать вековые климатические изменения и трансформации криолитозоны, необходимы соответствующие порядку времени прогноза системные наблюдения климата и ММП в планетарном масштабе. Собственно, эти цели и преследует CALM. Для надежной оценки тенденций изменения глубины протаивания необходимо предварительно обоснованно “очистить” эмпирические графики наблюдений от периодической составляющей, предоставив исчерпывающую интерпретацию последней. При этом короткопериодные колебания не менее привлекательны и актуальны для исследований, чем глобальные реконструкции климата и состояния криолитозоны. Велика и их практическая значимость в части прогнозирования активизации опасных криогенных процессов в XXI в. – реальной и уже происходившей [4, 5, 18].

Определенно о влиянии внутривековых колебаний климата на динамику мерзлотных условий высказались В.А. Кудрявцев, П.Ф. Швецов, Л.Н. Максимова, С.Ю. Пармузин [16, 24, 29, 38]. В более поздних работах показано, что с колебаниями климата связаны периодические изменения активности криогенных процессов [3, 4]. В то же время многие исследователи вольно или невольно рассматривают короткопериодные колебания параметров климата и сезонного протаивания как шум и нивелируют его осреднением рядов наблюдений [26, 27]. Среди причин такого отношения к коротким флуктуациям температуры воздуха и мощности СТС – их квазипериодичность (переменная амплитуда, смещение фаз колебаний, выпадение отдельных экстремумов из рядов наблюдений по разным ландшафтам).

Ряды короткопериодных колебаний температуры воздуха, количества осадков метеорологи обычно рассматривают как климатические спектры, отражающие динамические свойства атмосферы Земли. Соответствующие экстремумы коротких периодов в климатологии принято считать “ложными”, имеющими вероятностную природу [12, 25]. Известны представления, согласно которым различают изменчивость климата (с частотой “нескольких десятилетий”), собственно колебания климата (с частотой более “нескольких десятилетий”) и климатические изменения (необратимые) [11]. Исследователи динамических связей атмосферной циркуляции и климата также акцентируют внимание на циркуляционных эпохах (закономерное соотношение меридиональной и зональной циркуляции за 25-50 лет) и синоптических периодах (устойчивое сопряжение циклонов и антициклонов в течение 5-7 суток) [9, 11, 14]. В результате между погодой и климатом (средние значения климатических показателей за 20, 30, 40, 65 лет) существует брешь в метеорологических исследованиях, которую в прогнозах заполняют осредненными данными наблюдений погоды предшествующих лет.

Выяснить причины разнопериодных колебаний климата исследователи пытаются в основном за счет поисков космических факторов, управляющих земной погодой [34]. С 3-6 и 8-11-летними циклами увязывают геометрические характеристики орбит Луны, Юпитера, Венеры, Марса, периодизацию солнечной активности и геомагнитной возмущенности Земли [12, 14, 21, 35]. По мнению исследователей, реализуется влияние космоса через закономерные флуктуации атмосферной циркуляции, которые в свою очередь вызывают периодические изменения климатических показателей.

Наиболее спорным моментом с длительной историей взаимного неприятия точек зрения является связь периодических изменений климатических показателей, прежде всего температуры воздуха с 11-летними циклами солнечной активности [42, 43]. Данный вопрос хорошо освещен в интернете и многочисленных публикациях, поэтому остановимся на главных аргументах сторон. Доводы за отсутствие этой связи сводятся к малым отклонениям (0.1 %) инсоляции в годы активизации, что с учетом защитных свойств внешних оболочек Земли исключает возможность влияния солнечных вспышек на тепловой баланс планеты. При этом отмечается нарушение синхронности солнечной активности и роста температуры воздуха или вообще его отсутствие. Сторонники связи 11-летних солнечных циклов с температурой воздуха моделируют периодические климатические изменения за счет гамма, рентгеновского и ультрафиолетового излучения,

вариации которых значительны (3-5 раз), а также корональных выбросов массы (КВМ) – солнечной плазмы, которые через возмущение магнитосферы, ионосферы и воздействия на озоновый слой, в итоге, выступают источниками разогрева тропосферы [22, 41]. Данные процессы в той или иной степени могут быть факторами 8-11-летних вариаций глубины сезонного протаивания.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследования являлись площадки циркумполярного мониторинга СТС², расположенные в Евразии и Северной Америке. Выбор площадок для анализа данных наблюдений определялся их сходством: единой методикой измерений (размер площадки 100x100 м, сеть пикетов 10x10 м); продолжительностью непрерывных наблюдений (≥ 20 лет); циркумполярным расположением в тундровой зоне с равнинными мерзлотными ландшафтами; мелким типом сезонного протаивания (строение профиля почв). Площадок CALM мониторинга мощности СТС, удовлетворяющих предъявленным требованиям, оказалось всего 8, но почти равномерно распределенных в полосе 65-75°N (табл. 1).

Основными объектами, для которых выполнялись расчеты и графическое моделирование, были площадки R9 мыс Рогожный и R11 гора Дионисий,

² URL: <http://www.gwu.edu/~calm/data/>

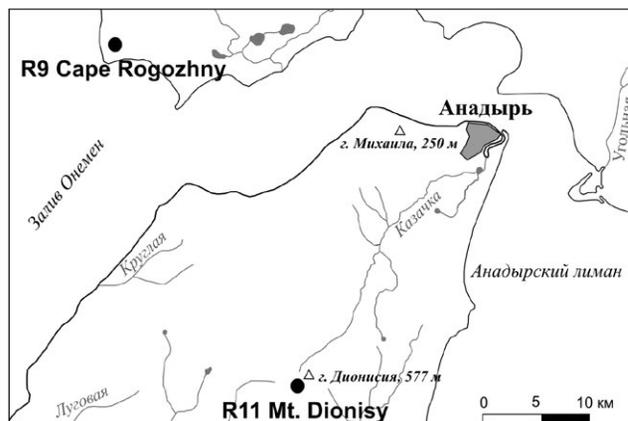


Рис. 1. Расположение площадок CALM мониторинга СТС на картосхеме окрестностей г. Анадыря.

расположенные в пределах Анадырской низменности Чукотки, в наблюдениях которых автор статьи принимает участие с 2002 года. По своему положению в рельефе площадки характеризуют автономный и подчиненный (транзитный) ландшафт, удалены на 22 (R11) и 25 (R9) км от города Анадырь, где расположена одноименная метеостанция (рис. 1). Подробное описание этих площадок, а также методов полевых исследований доступно на сайте данных CALM и в публикациях [32].

В рамках настоящей работы основной задачей было изучение природы короткопериодных гармоник. Вследствие этого, главными методами

Таблица 1. Площадки CALM мониторинга СТС

№	Индекс и наименование площадки	Координаты	Годы наблюдений	Природные условия, высота над уровнем моря	Примечание
1.	R2 Ayach-Yakha, Vorkuta (Аяч-Яга, Воркута)	67° 35' N 64° 11' E	1996-2016	Увалистая равнина Большеземельской тундры, 148 м	
2.	R5 Vaskiny Dachy, Yamal Peninsula (Васькины Дачи, Ямал)	70° 17' N 68° 54' E	1993-2016	Приморская аллювиально-озерная низменность, 29 м	Пропуск наблюдений 2003 г.
3.	R9 Cape Rogozhny, Chukotka (мыс Рогожный, Чукотка)	64° 47' N 176° 58' E	1994-2016	Морская аллювиально-озерная низменность, 26 м	
4.	R11 Mt. Dionisy, Chukotka (гора Дионисия, Чукотка)	64° 34' N 177° 12' E	1996-2016	Подножье горного обрамления аллювиально-озерной низменности, 150 м	Пропуск наблюдений 2006 г.
5.	U4 West Dock (Западный причал, Аляска)	70° 22' N 148° 33' W	1996-2016	Приморская аллювиально-озерная низменность, 3 м	
6.	U6 Deadhorse (Гиблое место, Аляска)	70° 10' N 148° 28' W	1996-2016	Приморская аллювиально-озерная низменность, 17 м	
7.	G1 Zackenberg (Закенберг, Гренландия)	74° 29' N 20° 33' W	1996-2016	Прибрежная увалистая равнина, 36 м	
8.	S2 Abisko area, Sweden (Абиску, Швеция)	68° 20' N 18° 50' E	1990-2016	Заболоченная тундра на горном плато, 450 м	

Примечание. Более подробно с природными условиями местоположения площадок CALM можно ознакомиться по адресу <http://www.gwu.edu/~calm/data/>

исследований являлись элементарный графический, математический и статистический сравнительный анализы рядов колебаний в заданном интервале наблюдений.

При анализе временных рядов значений физических величин традиционно используется представление результатов наблюдений в виде тригонометрических рядов Фурье. Данная операция позволяет получать уравнения, достаточно полно описывающие разнопериодные и разноамплитудные колебания изучаемого параметра в заданных пределах наблюдений:

$$H(t) = A_0 + \sum_{k=1}^n \left(a_k \sin \frac{2\pi t}{T_k} \right) + \left(b_k \cos \frac{2\pi t}{T_k} \right), \quad (1)$$

где H – глубина протаивания, t – порядковый номер года в ряду наблюдений, A_0 – коэффициент, определяющий смещение графика по оси ординат³, k – гармоническая составляющая, или k -гармоника, T_k – период колебаний гармоник, a_k и b_k – амплитуды колебаний гармоник, n – число гармоник.

Алгоритм разложения кривых колебаний температуры атмосферы в виде рядов Фурье неоднократно был описан в исследованиях [5, 36, 37]. В этих работах дано подробное описание методики определения периода и амплитуды гармоник.

Графический метод разложения эмпирической кривой, образованной временными рядами периодических и линейных функций, также не оригинален. Выделяются экстремумы и точки перегиба кривой. По этим точкам определяются средние величины периода колебаний и амплитуды. Далее в графическом редакторе Excel в автоматическом режиме подбираются такие параметры колебаний, чтобы график остатков приобрел форму, приближенную к прямой линии. В результате опытные кривые колебаний должны стать максимально подобными графику периодической функции, а график остатков – соответствовать прямой линейной функции.

Следует отметить, что в рамках настоящего исследования не требовалось достичь полного разложения кривых колебаний мощности СТС с представлением результата в виде ряда Фурье (уравнения) с конечным количеством гармоник. Задачей математического и графического анализа было попытаться очистить временной ряд сезонного оттаивания от коротких флуктуаций, описать эти короткие колебания и “очищенный” ряд (кривую вычисленных остатков).

ПЕРИОДИЧНОСТЬ ГЛУБИНЫ СЕЗОННОГО ПРОТАИВАНИЯ

Эмпирические графики сезонного протаивания представлены на рис. 2. Конфигурация кривых позволяет предполагать наличие короткопериодных колебаний мощности СТС во всех меридиональных секторах северного полушария, в зоне влияния различных океанов и континентов. В среднем для площадок, по данным графического анализа, продолжительность периода коротких колебаний мощности СТС составила 2.58 (± 0.1) лет при максимумах глубины протаивания (1/2 амплитуды колебаний) в экстремумах 11.2 % (табл. 2).

Отличаются хорошим подобием конфигурации кривых мощности СТС для площадок, расположенных в одном меридиональном секторе: Чукотка (R9, R11), Аляска (U4, U6). Экстремумы совпадают или смещены на год в аномальные по величине сезонного протаивания годы (см. рис. 2). Для максимумов: **2004-2007** – R9, R11, U4, U6, R5, R2; **2011-2013** – R5, R2 U4, U6, R9, G1, R2. Для минимумов: **1999** – S2, G1, R9, R5, R2; **2009** – U4, U6, R5, R2, R9. При этом в отдельные годы колебания находятся в противофазе, даже на сопряженных, но с разной ландшафтной позицией площадках – R9, R11 (1999, 2011, 2012) (рис. 3). В целом анализ эмпирических графиков указывает на закономерный характер изменений глубины сезонного протаивания во времени и пространстве, обусловленный влиянием внешних и внутренних факторов. Последнее касается сопряженных площадок с различной ландшафтной позицией (см. табл. 1).

Причиной колебаний могут быть периодические осадки и пучение деятельного слоя после активного протаивания. Такая ситуация отчасти уже была рассмотрена для площадки R2 Аяч-Яга, Воркута [23]. В идеальных для этого условиях, когда имеется дренаж надмерзлотных вод и сохраняется неизменным растительный покров, график мощности СТС будет иметь вид кривой с затухающими колебаниями. При этом должно присутствовать изначальное возмущение колебаний внешним фактором (аномально теплый год).

Если же учитывать непрерывное внешнее воздействие, например, линейный или близкий к нему в интервале наблюдений рост температуры воздуха, график за счет разницы глубины протаивания и осадки поверхности приобретет ступенчатый вид, в котором ступени будут соответствовать годам осадки поверхности, а подступени – увеличению протаивания на фоне роста температуры. В этом варианте на участке будет развиваться термокарст, что отмечено при мониторинге площадки R2 Аяч-Яга (см. рис. 2) [23].

³ Данный коэффициент необходим для исключения отрицательных значений функции (сезонного протаивания).

Еще один вариант интерпретации – рассмотреть периодические изменения мощности СТС как вынужденные колебания под воздействием внешнего переменного фактора соответствующей частоты. Реализовываться это внешнее воздействие будет через периодические изменения влажности деятельного слоя и интенсивности теплового потока (теплооборота). При этом конфигурация кривой мощности СТС, кроме вынужденных колебаний, будет отражать внутренние колебания, связанные с осадкой поверхности и новообразова-

ниями льда, а также воздействие других внешних факторов с различной динамикой.

Здесь важно заметить, что амплитуда коротких колебаний сезонного протаивания может оказаться хорошим показателем устойчивости кровли ММП и мерзлотных ландшафтов в целом к внешнему аномальному воздействию. Известно, что глубина сезонного протаивания при прочих равных условиях определяется особенностями растительного покрова, теплофизическими свойствами почв и льдистых грунтов подошвы

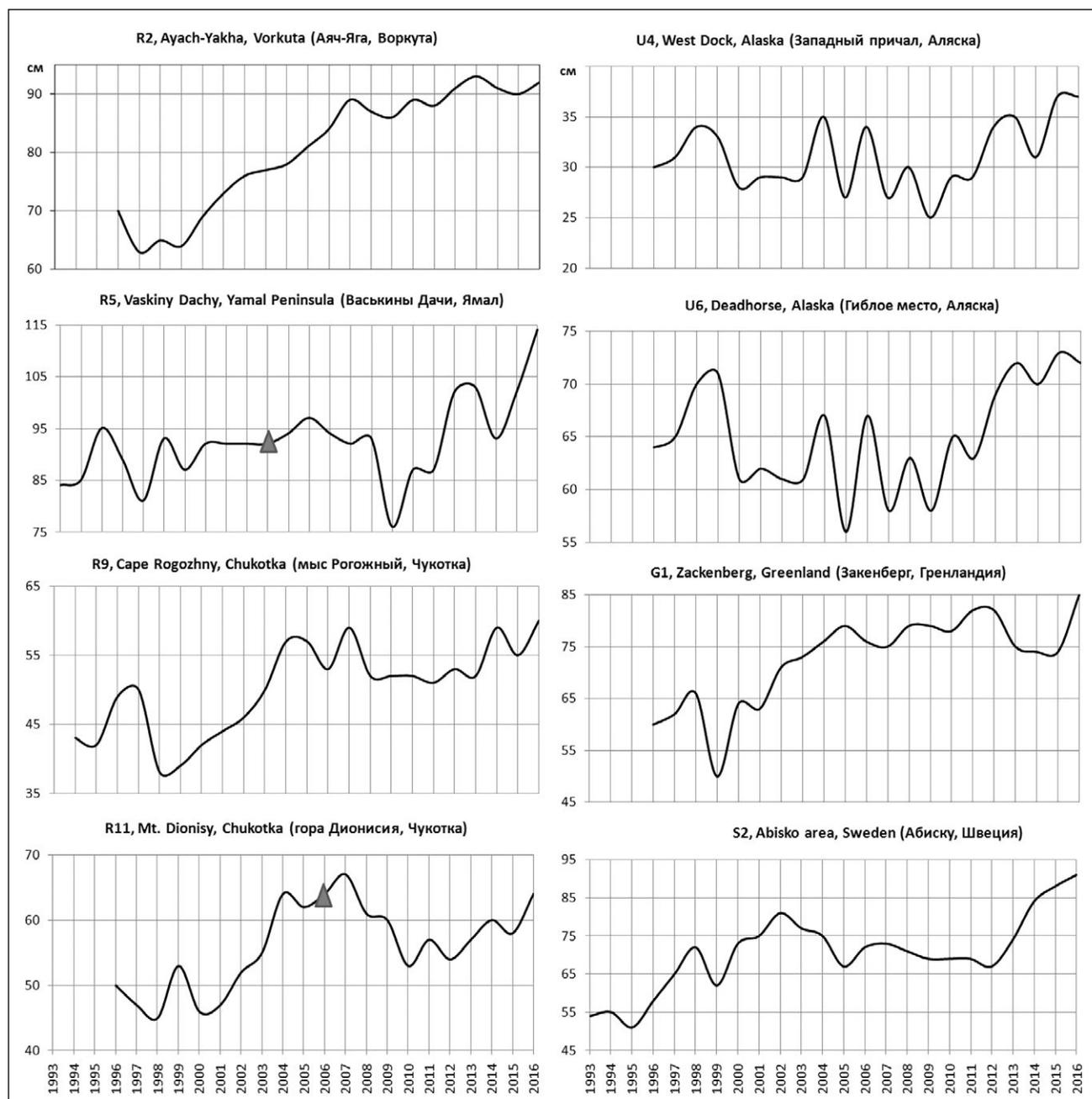


Рис. 2. Графики сезонного протаивания тундровых почв на площадках CALM. Треугольным значком показан пропуск наблюдений (см. табл. 1).

Таблица 2. Периоды и амплитуды колебаний мощности СТС

T, лет	N	A, %	N	A, %	N	A, %	N	A, %
		R2 Ayach-Yakha, Vorkuta (Аяч-Яга, Воркута)		R5 Vaskiny Dachy, Yamal Peninsula (Васькины Дачи, Ямал)		R9 Cape Rogozhny, Chukotka (мыс Рогожный, Чукотка)		R11 Mt. Dionisy, Chukotka (гора Дионисия, Чукотка)
2	2	4-5	3	5-10	3	4-12	4	5-15
3	1	6	2	15,5	3	5-24	2	5-10
4	1	6	1	5.5	1	7	0	0
	U4 West Dock (Западный причал, Аляска)		U6 Deadhorse (Гиблое место, Аляска)		G1 Zackenberg (Закенберг, Гренландия)		S2 Abisko area, Sweden (Абиску, Швеция)	
2	4	7-26	4	5-15	4	5-15	3	7-10
3	2	7-15	3	5-15	3	7-15	1	15
4	1	15	0	0	1	7	1	10

Примечание. T – период, N – количество циклов, A – амплитуда в % от среднего значения мощности СТС.

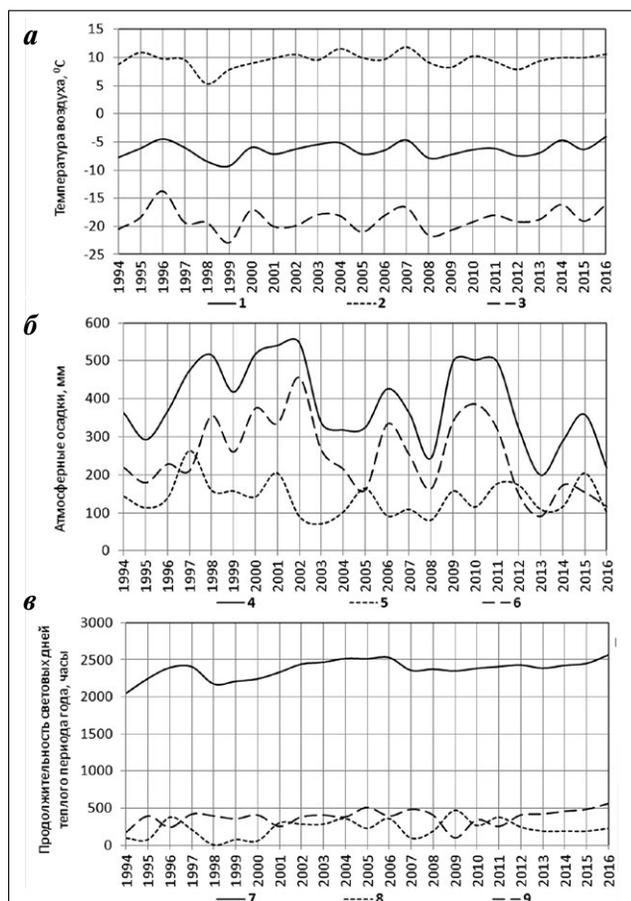


Рис. 3. Динамика температуры воздуха (а), атмосферных осадков (б) и продолжительности световых дней теплового периода года (в) по данным метеостанции Анадырь: 1 – среднегодовая температура; 2 – средняя температура теплового периода; 3 – средняя температура холодного периода; 4 – среднегодовое количество осадков; 5–6 – среднее количество осадков: 5 – жидких, 6 – твердых; 7 – суммарная продолжительность световых дней теплового периода года; 8–9 – приращение продолжительности теплового периода за счет световых дней: 8 – в мае-июне, 9 – в сентябре-октябре.

деятельного слоя [13, 16]. Значительная амплитуда колебаний протаивания при отсутствии признаков деградации мерзлоты показывает адаптированность мерзлотного ландшафта к аномалиям внешнего воздействия. А меньший период колебаний мощности СТС указывает на быстрое восстановление соответствия геокриологических условий мерзлотного ландшафта нормальному (среднегодовому) состоянию. Таким образом, мерзлотный ландшафт будет тем более устойчив (K), чем больше амплитуда коротких колебаний (A , % от среднегодовой мощности СТС) и чем меньше период коротких колебаний (T , 2-5 лет) сезонного протаивания:

$$K = \frac{A}{T}. \quad (2)$$

Для обследованных площадок показатель K составляет: R2 Ayach-Yakha – 2; R5 Vaskiny Dachy – 4.3; R9 Cape Rogozhny – 4.6; R11 Mt. Dionisy – 4.8; U4 West Dock – 6.7; U6 Deadhorse – 4.5; G1 Zackenberg – 3.4; S2 Abisko Area – 4.2.

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА КОЛЕБАНИЯ ГЛУБИНЫ ПРОТАИВАНИЯ

Перечень факторов, влияющих на теплооборот мерзлотных почв, известен [16], однако в рамках настоящей работы нас интересуют процессы, определяющие короткие колебания сезонного протаивания. Глубина протаивания коррелирует с температурой воздуха, причем для различных климатических условий это могут быть положительная (среднелетняя температура) или отрицательная (среднезимняя температура) значимые корреляции. Известны работы, в которых отмечается значимая связь сезонного протаивания

с высотой снежного покрова на начало зимнего периода [15]. Широкое распространение получило использование “индекса протаивания” (degree days of thawing – DDT) – сумма положительных среднесуточных температур воздуха теплого периода года [16, 33]. Величины коэффициентов корреляции любых климатических характеристик с глубиной протаивания редко превышают 0.65.

Рассмотрим воздействие флуктуаций климатических показателей на примере R9 мыс Рогожный и R11 гора Дионисия. На Чукотке в Анадырской низменности, находящейся в зоне перехода от морского к континентальному субарктическому климату, максимально значимыми для оттаивания деятельного слоя являются продолжительность теплого периода года и температура воздуха (табл. 3). Причем температуры зимнего периода и высота снежного покрова на момент полного промерзания СТС не дают значимых корреляций, а осадки как твердые, так и жидкие даже проявляют отрицательные корреляции.

Периодическую динамику климатических показателей наглядно иллюстрируют графики временных рядов наблюдений климатических параметров на метеостанции Анадырь (рис. 4). Температура не имеет достоверной и значимой тенденции роста. Наиболее четко короткие колебания температур просматриваются для зимнего периода. Для среднегодовых температур продолжительность периода отдельных колебаний возрастает до 5 лет. Средняя продолжительность периода колебаний температур: зимой – 2.85, летом – 2.62, среднегодовой – 3.5 года. Амплитуда колебаний изменяется в пределах 2.5–4.5°C (см. рис. 3а). Характерные экстремумы температур воздуха приходятся на годы: 1998–1999 (–), 2001 (–), 2005 (–), 2008 (–), 2012 (–), 1996 (+), 2000 (+), 2003–2004 (+), 2007(+), 2010–2011 (+), 2014(+).

Здесь следует отметить общее сходство короткопериодных колебаний температуры воздуха по

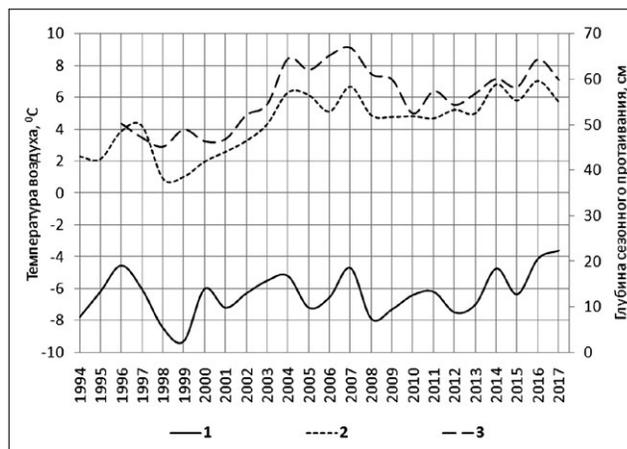


Рис. 4. Динамика температуры воздуха и глубины сезонного протаивания в Анадырской низменности: 1 – среднегодовая температура; 2 – глубина сезонного протаивания на площадке R9 мыс Рогожный; 3 – глубина сезонного протаивания на площадке R11 гора Дионисия.

разным регионам различных климатических областей. Так, например, по результатам анализа многолетних наблюдений (40–60 лет) в Якутии, подобные периоды коротких колебаний (лет) были выделены для метеостанций Саскылах (2.7), Тикси (2.7), Чокурдах (2.3), Верхоянск (2.7), Туой-Хая (4.5), Чульман (4.5) [36]. Такую же периодичность (2–5 лет) показывают изменения циркуляционных процессов в атмосфере северного полушария [14].

Осадки за период наблюдений характеризуются отрицательным и малодостоверным ввиду значимой амплитуды колебаний линейным трендом – 5.6 мм/год (см. рис. 3б). Средняя продолжительность периода (лет) колебаний осадков: твердые – 2.88, жидкие – 2.75, суммы осадков – 2.75. Амплитуда колебаний существенна и изменяется в пределах 50–300 мм. Характерные экстремумы количества осадков наблюдаются в годах: 1995 (–),

Таблица 3. Коэффициенты парной корреляции¹ мощности СТС и климатических показателей по данным метеостанции Анадырь

Площадки CALM	Температура, °C			Сумма часов светового дня теплого периода года, час	Осадки, мм		Высота снежного покрова на дату промерзания СТС ² , см
	среднегодовая	средняя			летние	зимние	
		теплого периода	холодного периода				
R9 Cape Rogozhny. Chukotka (мыс Рогожный, Чукотка)	0.6	0.58	0.35	0.72	-0.2	-0.45	0.21
R11 Mt. Dionisy. Chukotka (гора Дионисия, Чукотка)	0.35	0.55	0.08	0.66	-0.43	-0.5	0.34

¹Критическое значение коэффициента корреляции 5% уровня значимости для выборки – 0.423.

²Время перехода температуры через 0°C на подошве СТС изменяется в пределах 22.12–10.01.

1999 (–), 2003-2005 (–), 2008 (–), 2013 (–), 1998 (+), 2002 (+), 2006 (+), 2009-2011 (+), 2014-2015 (+).

Продолжительность периода с температурой выше нуля может прирастать за счет часов с положительной температурой в мае месяце и в сентябре-октябре. Ранняя весна ускоряет сход снежного покрова и начало оттаивания почв. Поздняя осень продлевает время протаивания СТС и ухудшает в случае раннего и быстрого формирования снежного покрова условия для промерзания верхних слоев ММП. Общая продолжительность теплого периода в часах светового дня за время мониторинга характеризуется положительным ростом – 11 час/год, или 240 часов за 22 года при амплитуде короткопериодных колебаний (период 2-3 года) 15-70 часов. Средняя продолжительность периода (лет) колебаний световых дней с положительной температурой: весной – 2.25, осенью – 2.22, за теплый период года – 2.57. Конфигурация годовой кривой позволяет также предположить на фоне линейного тренда колебания с периодом 10-11 лет. Колебания приращения продолжительности теплого периода весной и осенью находятся в противофазе (см. рис. 3*в*), то есть теплая осень сочетается с ранней весной и наоборот. С 2012 г. наблюдается увеличение продолжительности теплой осени на фоне мало меняющегося приращения теплых дней весной. Характерные экстремумы колебаний продолжительности теплого периода года в целом: 1998-1999 (–), 2007-2010 (–), 1996-1997 (+), 2004-2006 (+).

Таким образом, скоррелированность и удовлетворительное для эмпирических данных подобие кривых колебаний указывают на прямую связь флуктуаций температуры воздуха и продолжительности теплого периода с короткими колебаниями сезонного протаивания (см. рис. 3, 4). Краткие внутриклиматические циклы температуры атмосферы и продолжительности теплого периода в этом случае являются внешними факторами коротких вынужденных колебаний мощности СТС. Противоречивое влияние различных климатических факторов на сезонное протаивание обуславливает сложную форму графиков мощности СТС, затрудняющих их математическое и графическое моделирование.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Математическое и графическое выражение временных рядов – это одновременно инструмент анализа и форма представления наблюдаемых данных. Такая процедура в рамках настоящего исследования обусловлена необходимостью разложения эмпирических кривых и проверки достоверности выводов о периодическом характере

сезонного протаивания. На рис. 5 представлен результат моделирования колебаний сезонного протаивания на площадке R9 мыс Рогожный, полученный с использованием преобразования Фурье (а) и путем опытного подбора периодов и амплитуд колебаний (б). На каждой из диаграмм приведено по три графика, два из которых внизу – кривые периодических колебаний, а верхний – график остатков, вычисленных из ряда фактических наблюдений.

Уравнение синусоид:

$$H_t = A_0 + A_k \times \sin\left(\frac{2\pi}{T} \times (t + \varphi_1)\right), \quad (3)$$

где A_0 – эмпирический коэффициент смещения графика по оси ординат, A_k – средняя амплитуда коротких колебаний, t – порядковый номер года наблюдений, φ_1 – смещение начала первого периода. Для периода колебаний глубины сезонного протаивания 2.7 лет: $A_0 = 3$; $A_k = 3.1$; $\varphi_1 = (-1)$. Для периода колебаний глубины сезонного протаивания 10 лет: $A_0 = 11$; $A_k = 4$; $\varphi_1 = 3$ (см. рис. 5*а*).

Кривая остатков математического моделирования колебаний далека от ожидаемого идеала. Достоверность линейного тренда графика остатков малозначима ($R^2=0.97$). Изменение значений постоянных коэффициентов функции, сведение периода 2.7 лет к ближайшему целому значению – 3 – не решает проблему.

На второй диаграмме у опытных кривых колебания негармонические, параметры переменны: периоды – 2-3 года и 8-12 лет; амплитуды – 3-5 и 10-13 см (см. рис. 5*б*). Смещение фаз подобрано так, что экстремумы опытной кривой соответствуют пикам графика фактических измерений сезонного протаивания (см. рис. 3). Кривая остатков по конфигурации близка к линейному графику с достоверным трендом ($R^2=0.59$) увеличения глубины сезонного протаивания – 16 см за 23 года (см. рис. 5*б*).

Результат математического и графического моделирования колебаний, учитывая стохастический характер проявления природных факторов, вполне удовлетворительный. Выделяется две гармоника, с периодами, соответствующими колебаниям температуры воздуха (2-3 года) и продолжительности теплого периода (8-11 лет). Очищенный от короткопериодных флуктуаций график остатков имеет линейный вид с тенденцией роста глубины сезонного протаивания. Становится ясной проблема смещения фаз экстремумов коротких колебаний. В одних случаях максимум протаивания определяется сочетанием ранней весны и жаркого лета. В других случаях на глубину протаивания влияет сопряжение поздней осени и теплой

зимы или проявление всех коррелирующих с глубиной протаивания климатических факторов.

ПЕРИОДИЧНОСТЬ МЕРЗЛОТНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Смена погодных периодов может происходить в разные сезоны календарного года, в результате чего наблюдаются квазипериодические циклы и колебания глубины протаивания с ненатуральным числом — 2.7 года, то есть циклы могут повторяться в различных комбинациях циклонической и антициклонической погоды продолжительностью 2-3 календарных года. Вопрос сопряжения различных типов атмосферной циркуляции подробно рассмотрен при анализе синоптических карт XX века [9, 14]. При этом проанализированы изменения элементарных циркуляционных процессов (ЭЦМ), сделаны выводы о соответствии циркуляционных эпох внутривековым изменениям климата. Короткие колебания (2-5 лет) продолжительности ЭЦМ и их группировок констатируются, используются для описания циркуляционных эпох, но никак не обсуждаются.

Все это в совокупности позволяет обратить внимание на существование некоего “климатического года” — статистической единицы климата, которая отличается от календарного года продолжительностью, временем смены сезонов и равна периоду колебаний мощности СТС. Допускается возможность соотнесения такой меры измерения климата с колебаниями ЭЦМ, но для этого потребуется их перегруппировка, исходя из характера воздействия сезонных зональных и меридиональных циркуляционных процессов атмосферы на глубину протаивания.

Такие “климатические года” за пределами криолитозоны, вероятно, могут быть выявлены по колебаниям глубины сезонного промерзания. В этой связи нельзя не упомянуть устные народные календари климата хлеборобов зоны рискованного земледелия северных широт, в которых по погоде ключевых календарных дат можно, по существу, распознать, какой начался (или идет) цикл (климатический год), и прогнозировать время и условия (влажность и прогрев пашни, засуха) предстоящих сельскохозяйственных работ.

Незначительное смещение фаз коротких колебаний сезонного протаивания площадок CALM в различных регионах северного полушария увязывается с мнением синоптиков о взаимообусловленности и инерционности циркуляционных процессов в Арктике, в северной части Тихого и Атлантического океанов. Тем самым можно обоснованно предполагать, что “климатический год” в долготном и широтном месторасположении тер-

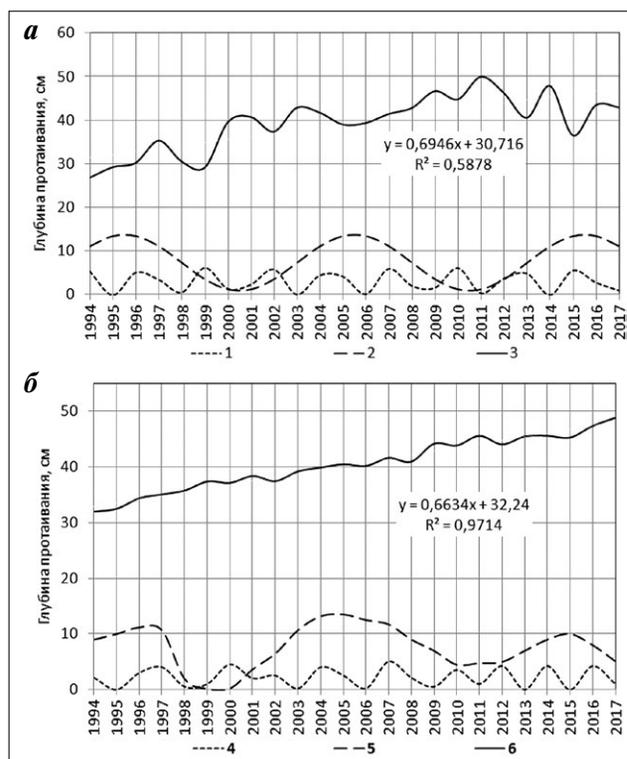


Рис. 5. Математическое (а) и графическое (б) моделирование коротких колебаний сезонного протаивания для площадки R9 мыс Рогожный: 1-2 — синусоида колебаний глубины сезонного протаивания с периодом: 1 — 2.7 лет, 2 — 10 лет; 3 — расчетные остатки глубины сезонного протаивания математического моделирования; 4-5 — колебания сезонного протаивания с периодом: 4 — 2-3 года, 5 — 8-11 лет; 6 — расчетные остатки глубины сезонного протаивания графического моделирования.

риторий будет иметь примерно равный период (2-3 года), но отличаться смещением фаз (1-1.5 года).

ПЕРИОДИЧНОСТЬ ПРОТАИВАНИЯ И СОЛНЕЧНЫЕ ЦИКЛЫ

Анализируя природу коротких колебаний климата и сезонного протаивания невозможно обойти вниманием вопрос влияния на колебания мощности СТС солнечной активности. Графики 20-летних наблюдений сезонного протаивания позволяют обсуждать возможность наличия таких циклов, сопоставимых по продолжительности с динамикой солнечной активности (R5, R9, R11, U4, U6, S2) (см. рис. 2). На графике сезонного протаивания, “очищенном” от 2-3-летних колебаний, они видны более определенно — 23-й солнечный цикл (максимум 2003-2007) и 24-й солнечный цикл (максимум 2014-2016) (см. рис. 5б). Похожую, но менее очевидную динамику показывает график продолжительности теплого периода года (см. рис. 3в). Каких либо значимых 11-летних

колебаний температуры атмосферы для Анадырской низменности не наблюдается.

Рассматривая доводы и контраргументы оппонентов влияния солнечных циклов, автор настоящей статьи обратил внимание на радиоволновую составляющую Солнца, которая, составляя миллионные доли процентов от энергии, поступающей на поверхность Земли, в сотни тысяч раз возрастает во время “вспышек” [10]. Прохождению радиоволн в микроволновом (5-100 см) и в метровом (1-10 м) диапазонах не препятствуют верхние слои атмосферы и облачность. В числе других доводов в пользу радиоволнового влияния Солнца на 10-летние колебания сезонного протаивания – успешные испытания в 1990-х годах электромагнитных установок для разупрочнения и оттаивания мерзлых грунтов [30]. Работы показали высокую эффективность этой технологии. За 5-10 мин при частоте 915 МГц ($\lambda \approx 0.33$ м) глубина протаивания составила 0.25-0.35 м, при частоте 430 МГц ($\lambda \approx 0.7$ м) эффективная глубина проникновения волнового излучения увеличилась до 0.8 м [31]. Плотность потока мощности в различных условиях испытаний была 5-20 Вт/см², энергозатраты на протаивание мерзлого грунта составляли до 24 кВт/м³ [30]. Эти значения по мощности в сотни и тысячи раз превышают поток солнечной радиации в июне – 0.016 Вт/см², но существенно меньше величины годовой солнечной радиации – 75.6 Ккал/см² (метеостанция Анадырь) и расхода солнечного тепла (16%) на протаивание слоя мощностью 0.5 м – 281.3 кВт/м³ [6]. При радиоволновом оттаивании энергетическому воздействию подвергается диэлектрик – мерзлый ледсодержащий слой (разупрочнение), а нагревание фиксируется только на фронте протаивания мерзлого слоя.

Плотность потока солнечного радиоизлучения на орбите Земли в спокойных условиях изменяется от 10⁻¹⁰ Вт/м² на сантиметровых волнах до 10⁻¹² Вт/м² в метровом диапазоне. Она возрастает во время всплесков, связанных с крупными вспышками, до 10⁻⁶ Вт/м² соответственно [10]. Это, даже с учетом спорадического радиоизлучения (шумовые бури), существенно ниже потока эффективной солнечной радиации (10⁻³ Вт/см²). Однако речь идет не о сопоставлении и тем более не о конкуренции источников растепления мерзлых грунтов, но о возможном вкладе радиоизлучения в дезинтеграцию (разупрочнение) ледсодержащих грунтов на фронте протаивания. Важно заметить, что всплески радиоизлучения не вызывают разогрева воздуха атмосферы, тем самым исключается вопрос о прямой связи солнечных циклов с повышением температуры атмосферного воздуха.

ВЫВОДЫ

1. Короткие квазипериодические колебания глубины сезонного протаивания характеризуются периодом 2-3 года и амплитудой 4-26% от среднемноголетней глубины протаивания. По своей природе короткие колебания являются вынужденными, связанными с периодическими флуктуациями температуры воздуха и продолжительности теплого периода года. Короткие колебания мощности СТС на площадках приближены к синусоиде с периодом 2.7 года.

2. Колебания сезонного протаивания с периодом 8-12 лет связаны с соответствующими вариациями продолжительности теплого периода года при отсутствии такой периодичности у температуры атмосферы. Зафиксированный линейный тренд роста сезонного протаивания может быть составной частью колебаний с периодом, превышающим срок наблюдений мощности СТС на площадках CALM.

3. Отношение средней амплитуды коротких колебаний протаивания к периоду можно рассматривать как меру устойчивости кровли ММП к аномальному воздействию, обусловленной особенностями почвенно-растительного покрова, свойствами и строением верхних слоев многолетней мерзлоты. По данному показателю наименее устойчива кровля ММП на площадках R2 и G1 – тундры равнин на атлантической периферии криолитозоны (см. табл. 1). Наиболее устойчивыми являются промерзающие ландшафты аласов северного склона Аляски U4 и U6.

4. Введение понятия “климатический год” как периода колебания глубины протаивания позволяет выделить временные интервалы закономерного сопряжения различных типов погоды, зональной и меридиональной атмосферной циркуляции, результатом которых является увеличение или уменьшение мощности СТС. Слой сезонного протаивания в отличие от динамических атмосферы и гидросферы – стабильная депонирующая среда для короткопериодичных возмущений климата. График колебаний сезонного протаивания в этом плане является не только характеристикой состояния кровли ММП, но и своеобразной “кардиограммой” мерзлотного ландшафта и климата.

Свойства излучения радиоволнового диапазона позволяют рассматривать возможность его значимого вклада в увеличение глубины сезонного протаивания в ходе циклов солнечной активности. Увеличение сезонного протаивания (1995-1998; 2004-2007, 2014-2017) может происходить за счет дезинтеграции льдистых прослоев с низкой диэлектрической проницаемостью под воздействием потоков радиоволнового излучения

сантиметрового и метрового диапазонов с частотой менее 400 МГц и глубиной проникновения более 1 м. Данная гипотеза не исключает влияния космического и, что важно, возрастающего техногенного радиоволнового излучения на таяние кровли ММП, полярных льдов и ледников.

Источник финансирования. *Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 18-05-60036, международной программы CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring), грант NSF OPP-9732051 и OPP-0225603.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анисимов О.А.* Об оценке чувствительности вечной мерзлоты к изменению глобального термического режима земной поверхности // *Метеорология и гидрология*. 1989. № 1. С. 40-46.
2. *Богородский П.В., Макитас А.П., Кустов В. Ю. и др.* Динамика сезонного протаивания вечной мерзлоты в районе гидрометеорологической обсерватории Тикси // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2015. № 4 (106). С. 88-98.
3. *Васильев А.А.* Динамика морских берегов в криолитозоне западного сектора Российской Арктики (на примере Карского моря). Автореферат докт. дисс. Тюмень: Ин-т Криосферы Земли СО РАН, 2004. 49 с.
4. *Васильев А.А., Покровский С.И., Шур Ю.Л.* Динамика термоабразионных берегов Западного Ямала // *Криосфера Земли*. 2001. Т. V. № 1. С. 44-52.
5. *Великоцкий М.А., Федоров В.М.* Короткопериодные колебания климата в Большеземельской тундре и прогноз изменения мерзлотных условий // *Криосфера Земли*. 2003. Т. VII, № 3. С. 85-93.
6. Геофизика и антропогенные изменения ландшафтов Чукотки / И.В. Игнатенко, И.М. Папернов, Б.А. Павлов, М.Н. Замош, И.Н. Скородумов. М.: Наука, 1987. 271 с.
7. *Гершензон В.Е., Смирнова Е.В., Элиас В.В.* Информационные технологии в управлении качеством среды обитания / Под ред. В.Е. Гершензон. М.: Изд-во "Академия", 2003. 288 с.
8. *Григоревская А.В., Оленченко В.В., Шеин А.Н., Камнев Я.К.* Изучение глубины сезонного оттаивания на площадке циркумполярного мониторинга деятельного слоя // Сб. материалов междунар. науч. конф. "Интерэкспо Гео-Сибирь-2017", "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология". Т. 2. Новосибирск: Экспоцентр, 2017. С. 94-98.
9. *Дзержевский Б.Л.* Общая циркуляция атмосферы и климат: Избранные труды. М.: Наука, 1975. 288 с.
10. *Железняков В. В.* Электромагнитные волны в космической плазме, М.: Наука, 1977. 432 с.
11. *Зверев А.С.* Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 711 с.
12. *Иванов В.В.* Периодические колебания погоды и климата // *Успехи физических наук*. 2002. Т. 172. № 7. С. 777-811.
13. *Илларионов В.А.* Инженерное мерзлотоведение: Учебное пособие. Сыктывкар: Изд-во СыктГУ, 2014. 104 с.
14. *Кононова Н.К.* Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзержевскому. М.: Воентехиниздат, 2009. 372 с.
15. *Константинов П.Я., Аргунов Р.Н., Герасимов Е.Ю., Узаров И.С.* О связи глубины сезонного протаивания с межгодовой изменчивостью средней годовой температуры грунтов // *Криосфера Земли*. 2006. Т. X. №3. С. 15-22.
16. *Кудрявцев В.А.* Температура, мощность и прерывистость толщ мерзлых пород. Гл. VIII // *Основы геокриологии (мерзлотоведения)*. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 219-273.
17. *Лейбман М.О.* Динамика слоя сезонного оттаивания пород и методика измерения его глубины в различных ландшафтах Центрального Ямала // *Криосфера Земли*. 2001. Т.5. № 3. С. 17-24.
18. *Лейбман М.О.* Криогенные склоновые процессы и их геоэкологические последствия в условиях распространения пластовых льдов. Автореферат докт. дисс. Тюмень: Ин-т Криосферы Земли, 2005. 48 с.
19. *Логонов В.Ф.* Влияние солнечной активности и других внешних факторов на климат Земли // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. № 1. С. 163-182.
20. *Логонов В.Ф.* Изменчивость солнечной радиации и температуры в Северном полушарии в связи с вулканическими извержениями // *Известия ВГО*. 1983. Вып. 5. С. 401-411.
21. *Логонов В.Ф.* Солнечная активность и динамика климата. Обнинск: Информ. центр, 1975. 47 с.
22. *Лучко Б.И.* Годы грядущие (климат и погода XXI века) // *Наука и жизнь*. 2007. № 10. С. 26-30.
23. *Мажитова Г.Г., Каверин Д.А.* Динамика глубины протаивания и осадки поверхности почвы на площадке CALM в 1996-2006 гг. (Европейский Северо-Восток) // *Вестник института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН*. 2007. № 9 (119). С. 17-20.
24. *Максимова Л.Н.* О климатических ритмах в связи с геокриологическим прогнозом / Мерзлотные исследования. М.: Изд-во МГУ, 1983. Вып. XX. С. 63-72.

25. Монин А.С. Введение в теорию климата. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 248 с.
26. Монин А.С. Вращение Земли и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 112 с.
27. Павлов А.В. Мерзлотно-климатический мониторинг России: методология, результаты наблюдений, прогноз // Криосфера Земли. 1997. Т. I. № 1. С. 47-58.
28. Павлов А.В., Скачков Ю.Б., Какунов Н.Б. Взаимосвязь между многолетними изменениями глубины сезонного протаивания грунтов и метеорологическими факторами // Криосфера Земли. 2004. Т. VIII. № 4. С. 3-12.
29. Пармузин С.Ю. Динамика среднегодовых температур грунтов севера Западной Сибири при короткопериодных колебаниях климата / Гео-криологические исследования. М.: МГУ, 1987. С. 157-167.
30. Петров В.М. Новые применения радиоэлектроники: разупрочнение горных пород мощным электромагнитным полем СВЧ // Радиоэлектроника и телекоммуникации. 2002. № 4. С. 63-73.
31. Рябец Н.И. Основы разупрочнения и оттаивания мерзлых пород СВЧ-энергией. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1991. 155 с.
32. Трегубов О.Д., Львов А.П. Репрезентативность наблюдений глубины сезонной оттайки в тундровых ландшафтах // Вестник СВФУ. 2014. Т. 11. № 5. С. 89-99.
33. Тумель Н.В. Современное состояние мерзлых пород и их изменения в XXI веке // Инженерная геология. 2010. №2. С. 12-16.
34. Федоров В.М. Астрономическая климатология. М.: МГУ, 2002. 230 с.
35. Федоров В.М. Периодические возмущения и малые вариации солярного климата Земли // Доклады Академии Наук. 2014. Т. 457 № 2. С. 222-225.
36. Хрусталева Л.Н., Гарагуля Л.С., Гордеева Г.И. и др. Прогноз среднегодовой температуры воздуха на территории республики Саха (Якутия) по результатам ретроспективного анализа // Криосфера Земли. 2002. Т. VI. № 2. С. 66-74.
37. Хрусталева Л.Н., Емельянова Л.В., Кауркин В.Д. Усовершенствование методики прогноза ожидаемых мерзлотно-климатических изменений на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. 2003. Т. VII. № 2. С. 23-30.
38. Швецов П.Ф. Короткопериодные изменения температуры грунтов в Субарктике и их инженерно-геологическое значение / Доклады международной конференции по мерзлотоведению. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1963. С. 245-252.
39. Brown J., Taylor A.E., Nelson F.E., and Hinkel K.M. 1997. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: structure and current status. Abstracts of the 27th Arctic Workshop. Ottawa: University of Ottawa, Department of Geography. P. 25.
40. Brown, J., Hinkel K.M., and Nelson F.E. The circumpolar active layer monitoring (CALM) program: Research designs and initial results // Polar Geography. 2000. №24(3). P. 165-258.
41. Camp C.D., Tung K.-K. Stratospheric polar warming by ENSO in winter: A statistical study // Geophysical Research Letters, V. 34. 2007. P. 4.
42. Pittock A.B. A critical look at long-term Sun-weather relationships // Reviews of Geophysics and Space Physics. V. 16. Is. 3. 1978. P. 400-420.
43. Schurer A., Tett S.F.B., Hegerl G.C. Small influence of solar variability on climate over the past millennium // Nature Geoscience. V. 7. 2014. P. 104-108.

REFERENCES

1. Anisimov, O.A. *Ob otsenke chuvstvitel'nosti vechnoi merzloty k izmeneniyu global'nogo termicheskogo rezhima zemnoi poverkhnosti* [On the assessment of permafrost sensitivity to changes in the global thermal regime at the Earth's surface]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 1989, no. 1, pp. 40-46. (in Russian)
2. Bogorodskii, P.V., Makshtas, A.P., Kustov V. Yu., et al. *Dinamika sezonnogo protaivaniya vechnoi merzloty v raione gidrometeorologicheskoi observatorii Tiksi* [Dynamics of seasonal thawing of permafrost in the area of the Tiksi hydrometeorological observatory]. *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2015, no. 4 (106), pp. 88-98. (in Russian)
3. Vasil'ev, A.A. *Dinamika morskikh beregov v kriolitozone zapadnogo sektora Rossiiskoi Arktiki (na primere Karskogo morya)* [Dynamics of sea shores in the cryolithozone of the Western sector of the Russian Arctic (by the example of the Kara sea)]. Extended abstract of Doct. Sci. Dissertation. Tyumen, In-t Kriosfery Zemli SO RAN, 2004, 49 p. (in Russian)
4. Vasil'ev, A.A., Pokrovskii, S.I., Shur Yu.L. *Dinamika termoabrazionnykh beregov Zapadnogo Yamala* [Dynamics of thermoabrasion coasts in the Western Yamal]. *Kriosfera Zemli*. 2001, vol. V, no. 1, pp. 44-52. (in Russian)
5. Velikotskii, M.A., Fedorov, V.M. *Korotkoperiodnye kolebaniya klimata v Bol'shezemel'skoi tundre i prognoz izmeneniya merzlotnykh uslovii* [Short-period climate fluctuations in the Bolshezemelskaya tundra and forecast of changes in permafrost conditions]. *Kriosfera Zemli*, 2003, vol. VII, no. 3, pp. 85-93. (in Russian)
6. *Geofizika i antropogennye izmeneniya landshaftov Chukotki* [Geophysics and anthropogenic changes in Chukotka landscapes]. Ignatenko, I.V., Papernov, I.M., Pavlov, B.A., Zamoshch, M.N., Skorodumov, I.N. Moscow, Nauka, 1987, 271 p. (in Russian)

7. Gershenzon, V.E., Smirnova, E.V., Elias, V.V. *Informatsionnye tekhnologii v upravlenii kachestvom sredy obitaniya* [Information technologies in quality management of the environment]. Gershenzon, V.E., Ed., Moscow, Akademiya Publ., 2003, 288 p. (in Russian)
8. Grigorevskaya, A.V., Olenchenko, V.V., Shein, A.N., Kamnev, Ya.K. *Izuchenie glubiny sezonnogo ottaivaniya na ploshchadke tsirkumpolyarnogo monitoringa deyatel'nogo sloya* [Study of the seasonal thawing depth at the site of circumpolar monitoring of the active layer]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Interesko Geo-Sibir-2017"* [Proc. Intern. Sci. Conference on remote sensing methods and photogrammetry, environmental monitoring, geocology]. Novosibirsk, Ekspotsentr, 2017, vol. 2, pp. 94-98. (in Russian)
9. Dzerdzeevskii, B.L. *Obshchaya tsirkulyatsiya atmosfery i klimat: izbranny'e trudy* [General atmospheric circulation and climate. Selected works] Moscow, Nauka, 1975, 288 p. (in Russian)
10. Zheleznyakov, V.V. *E'lektromagnitnye volny v kosmicheskoi plazme* [Electromagnetic waves in space plasma]. Moscow, Nauka, 1977, 432 p. (in Russian)
11. Zverev, A.S. *Sinopticheskaya meteorologiya* [Synoptic meteorology]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1977, 711 p. (in Russian)
12. Ivanov, V.V. *Periodicheskie kolebaniya pogody i klimata* [Periodic fluctuations of weather and climate]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2002, vol. 172, no. 7, pp. 777-811. (in Russian)
13. Illarionov, V. A. *Inzhenernoe merzlotovedenie: uchebnoe posobie* [Engineering geocryology: textbook]. Syktyvkar, SyktGU Publ., 2014, 104 p. (in Russian)
14. Kononova, N.K. *Klassifikatsiya tsirkulyatsionnykh mekhanizmov Severnogo polushariya po B.L. Dzerdzeevskomu* [Classification of circulation mechanisms in the Northern hemisphere according to B. L. Dzerdzeevsky]. Moscow, Voentekhnizdat, 2009, 372 p. (in Russian)
15. Konstantinov, P.Ya., Argunov, R.N., Gerasimov, E.Yu., Ugarov, I.S. *O svyazi glubiny sezonnogo protaivaniya s mezhdogodovoi izmenchivost'yu srednei godovoi temperatury gruntov* [About connection of seasonal thawing depth with the inter-annual variability of average annual temperature of soils]. *Kriosfera Zemli*, 2006, vol. X, no. 3, pp.15-22. (in Russian)
16. Kudryavtsev, V.A. *Temperatura, moshchnost' i preryvistost' tolshch merzlykh porod*. [Temperature, power and discontinuity of frozen rock] *Osnovy geokriologii (merzlotovedeniya)* [Fundamentals of geocryology]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1959, pp. 219-273. (in Russian)
17. Leibman, M.O. *Dinamika sloya sezonnogo ottaivaniya porod i metodika izmereniya ego glubiny v razlichnykh landshaftakh Tsentral'nogo Yamala* [Dynamics of seasonal thawing of rocks and methods of measuring the power of the active layer in different landscapes of Central Yamal]. *Kriosfera Zemli*, 2001, vol.5, no. 3, pp. 17-24. (in Russian)
18. Leibman, M.O. *Kriogennnye sklonovye protsessy i ikh geoekologicheskie posledstviya v usloviyakh rasprostraneniya plastovykh l'dov* [Cryogenic slope processes and their geocological consequences in the conditions of stratal ice distribution]. Extended abstract of Doct. Sci. Dissertation. Tyumen, In-t Kriosfery Zemli SO RAN, 2005, 48 p. (in Russian)
19. Loginov, V.F. *Vliyanie solnechnoi aktivnosti i drugikh vneshnikh faktorov na klimat Zemli* [Influence of solar activity and other external factors on the Earth's climate]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2015, no. 1, pp. 163-182. (in Russian)
20. Loginov, V.F. *Izmenchivost' solnechnoi radiatsii i temperatury v Severnom polusharii v svyazi s vulkanicheskimi izverzheniyami* [Variability of solar radiation and temperature in the Northern hemisphere due to volcanic eruptions]. *Izvestiya VGO*, 1983, vol. 5, pp. 401-411. (in Russian)
21. Loginov, V.F. *Solnechnaya aktivnost' i dinamika klimata* [Solar activity and climate dynamics]. Obninsk, 1975, 47 p. (in Russian)
22. Luchko, B. I. *Gody gryadushhie (klimat i pogoda XXI veka)* [Years to come (climate and weather in the XXI century)]. *Nauka i zhizn*, 2007, no. 10, pp. 26-30. (in Russian)
23. Mazhitova, G.G., Kaverin, D.A. *Dinamika glubiny protaivaniya i osadki poverkhosti pochvy na ploshchadke CALM v 1996-2006 gg. (Evropeiskii Severo-Vostok)* [Dynamics of the depth of thawing and precipitation to the soil surface at the CALM site in 1996-2006 (European North-East)]. *Vestnik instituta biologii Komi nauchnogo centra Ural'skogo otdeleniya RAN*, no. 9 (119), 2007, pp. 17-20. (in Russian)
24. Maksimova, L.N. *O klimaticheskikh ritmakh v svyazi s geokriologicheskim prognozom* [On climate rhythms in connection with the geocryological forecast]. *Merzlotnye issledovaniya*. Moscow, MGU, vol. XX, 1983, pp. 63-72. (in Russian)
25. Monin, A.S. *Vvedenie v teoriyu klimata* [Introduction to the theory of climate]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1982, 248 p. (in Russian)
26. Monin, A.S. *Vrashchenie Zemli i klimat*. [The rotation of the Earth and climate]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1972, 112 p. (in Russian)
27. Pavlov, A.V. *Merzlotnoklimaticheskii monitoring Rossii: metodologiya, rezul'taty nablyudenij, prognoz* [Permafrost and climatic monitoring in Russia: methodology, results of observations, forecast]. *Kriosfera Zemli*, 1997, vol. I, no. 1, pp. 47-58. (in Russian)
28. Pavlov, A.V., Skachkov, Yu.B., Kakunov, N.B. *Vzaimosvyaz' mezhdru mnogoletnimi izmeneniyami glubiny sezonnogo protaivaniya gruntov i meteorologicheskimi faktorami* [Relationship between long-term changes

- in the depth of seasonal soil thawing and meteorological factors]. *Kriosfera Zemli*, 2004, vol. VIII, no. 4, pp. 3-12. (in Russian)
29. Parmuzin, S.Yu. *Dinamika srednegodovykh temperatur gruntov severa Zapadnoi Sibiri pri korotkoperiodnykh kolebaniyakh klimata* [Dynamics of average annual soil temperatures in the North of Western Siberia upon short-period climate fluctuations]. *Geokriologicheskie issledovaniya*, Moscow, MGU, 1987, pp. 157-167. (in Russian)
 30. Petrov, V.M. *Novye primeneniya radioelektroniki: razuprochnenie gornykh porod moshchnym elektromagnitnym polem SVCh* [New applications of radio electronics: rock softening with powerful electromagnetic field]. *Radioelektronika i telekommunikatsii*, 2002, no. 4, pp. 63-73. (in Russian)
 31. Ryabets, N.I. *Osnovy razuprochneniya i ottaivaniya merzlykh porod SVCh energiei* [Fundamentals of softening and thawing of frozen rocks by electromagnetic waves of high frequency]. Yakutsk, YaNCz SO RAN, 1991, 155 p. (in Russian)
 32. Tregubov, O.D., Lvov, A.P. *Reprezentativnost' nablyudenii glubiny sezonnoi ottaiki v tundrovyykh landshaftakh* [The representativeness of observations over the depth of seasonal thawing in tundra landscapes]. *Vestnik SVFU*, 2014, vol. 11, no. 5, pp. 89-99. (in Russian)
 33. Tumul', N.V. *Sovremennoe sostoyanie merzlykh porod i ikh izmeneniya v XXI veke* [The current state of frozen rocks and their changes in the XXI century]. *Inzhenernaya geologiya*, 2010, no. 2, pp. 12-16. (in Russian)
 34. Fedorov, V.M. *Astronomicheskaya klimatologiya* [Astronomical climatology]. Moscow, MGU, 2002, 230 p. (in Russian)
 35. Fedorov, V.M. *Periodicheskie vozmushcheniya i malye variatsii solyarnogo klimata Zemli* [Periodic disturbances and small variations of the earth's solar climate]. *Doklady Akademii Nauk*, 2014, vol. 457, no. 2, pp. 222-225. (in Russian)
 36. Khrustalev, L.N., Garagulya, L.S., Gordeeva, G.I. et al. *Prognoz srednegodovoi temperatury vozdukh na territorii respubliki Sakha (Yakutiya) po rezul'tatam retrospektivnogo analiza* [Forecast of average annual air temperature in the Republic of Sakha (Yakutia) based on the results of retrospective analysis]. *Kriosfera Zemli*, 2002, vol. VI, no. 2, pp. 66-74. (in Russian)
 37. Khrustalev, L.N., Emel'yanova, L.V., Kaurkin, V.D. *Usovershenstvovanie metodiki prognoza ozhidaemykh merzlotno-klimaticheskikh izmenenii na severe Zapadnoi Sibiri* [Improvement of the technique of predicting expected cryological climatic changes in the north of the Western Siberia]. *Kriosfera Zemli*, 2003, vol. VII, no. 2, pp. 23-30. (in Russian)
 38. Shvetsov, P.F. *Korotkoperiodnye izmeneniya temperatury gruntov v Subarktike i ikh inzhenerno-geologicheskoe znachenie* [Short-period changes in soil temperature in the Subarctic zone and their engineering-geological significance]. *Doklady mezhdunarodnoi konferentsii po merzlotovedeniyu*, Moscow, 1963, pp. 245-252. (in Russian)
 39. Brown, J., Taylor, A.E., Nelson, F.E., and Hinkel, K.M. 1997. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: structure and current status. *Abstracts of the 27th Arctic Workshop*. Ottawa: University of Ottawa, Department of Geography, p. 25.
 40. Brown, J., Hinkel, K.M., and Nelson, F.E. The circumpolar active layer monitoring (CALM) program: Research designs and initial results. *Polar Geography*, 2000, no. 24(3), pp. 165-258.
 41. Camp, C. D., Tung, K.-K. Stratospheric polar warming by ENSO in winter: A statistical study. *Geophysical Research Letters*, vol. 34, 2007, p. 4.
 42. Pittock, A. B. A critical look at long-term Sun-weather relationships. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, vol. 16, Is. 3, 1978, pp. 400-420.
 43. Schurer, A., Tett, S. F. B., Hegerl, G. C. Small influence of solar variability on climate over the past millennium. *Nature Geoscience*, vol. 7, 2014, pp. 104-108.

ABOUT THE NATURE OF SHORT-PERIOD FLUCTUATIONS OF SEASONAL THAWING DEPTH IN TUNDRA SOILS

© 2019 O. D. Tregubov

*North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute, Far-East Branch, Russian Academy of Sciences
Portovaya ul., 16, Magadan, 685000 Russia
E-mail: tregubov2@yandex.ru*

The series of 20-year-long observations of seasonal thawing have been studied on CALM plots in Eurasia and North America. The short-term (2-5 years) fluctuations of the active layer are considered. Similarities and differences in seasonal thawing of tundra soils in circumpolar countries are noted. The dynamics of seasonal thawing is analyzed by the example of two CALM plots in the Chukotka Autonomous District. Time series of changes in the depth of seasonal thawing are described using the mathematical methods. The amplitude, frequency and periods of oscillations are determined for them. The comparative graphical and statistical analysis of climate and seasonally thawed layer variations allowed us to judge on the nature and degree of influence of meteorological factors on the depth of soil thawing. The problems of interpretation of intra-century fluctuations of climatic parameters and seasonal thawing are considered. It is concluded that the duration of the warm season affects significantly the depth of seasonal thawing. It is noted that ignoring the intra-century variations in the parameters of climatic and permafrost landscapes is the cause of inconsistency of judgments about climate change trends and forecasts of permafrost degradation.

A new concept of “climatic year” was proposed as the conjugation of weather conditions for 2-3 years equally affecting the depth of thawing. The established statistical regularities in changing permafrost-climatic conditions can be used for the preparation of 3-5 and 10-15 summer weather forecasts. The use of the ratio of the average values of the amplitude to the period of short oscillations as an indicator of the stability of the roof of permafrost is justified.

The hypothesis of the influence of solar and technogenic electromagnetic radiation in the radio-wave range on the degradation of underground ice of the active layer and Arctic ice is proposed.

Keywords: *permafrost, active layer, CALM, global warming, permafrost landscape, climate fluctuation, solar cycle.*

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-7809201943-17>