

**СЕЗОННОЕ ПРОТАИВАНИЕ ПОРОД В БЕРИНГИИ
НА ФОНЕ СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ¹**

*А.А. Маслаков**, *В.Т. Рузанов***, *Д.Г. Фёдоров-Давыдов****, *Г.Н. Краев*****,
*С.П. Давыдов******, *Д.Г. Замолотчиков*****, *О.Д. Трегубов***,
*Н.И. Шикломанов******, *Д.А. Стрелецкий******

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
(Москва)

**Чукотский филиал Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского
института им. Н.А. Шило Дальневосточного отделения РАН
(Чукотский автономный округ, г. Анадырь)

***Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
(Московская обл., г. Пушкино)

****Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
(Москва)

*****Северо-Восточная научная станция Тихоокеанского института географии
Дальневосточного отделения РАН
(Республика Саха (Якутия), пос. Черский)

*****Университет Джорджа Вашингтона
(США, Вашингтон)

Представлены результаты многолетних мониторинговых исследований динамики сезонного протаивания пород в различных районах палеорегиона Берингия: Колымская и Анадырская низменности, берег залива Лаврентия, полуостров Сьюард и мыс Барроу. Основу фактического материала составили данные полевых измерений, проведенных в рамках программы циркумполярного мониторинга сезонноталого слоя

¹Работа выполнена при поддержке гранта NSF PLR-1304555, НИР АААА-А16-116032810095-6 (камеральный этап) и в рамках темы госзадания Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (№ 01201355191). Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории криологии почв Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН: кандидату геолого-минералогических наук А.Л. Холодову, кандидату биологических наук А.В. Лупачеву, кандидату географических наук Д.Г. Шмелеву, В.А. Сорокикову, а также жителю пос. Черский Э.М. Ланга и жителю пос. Лаврентия Зеленскому Г.М. за неоценимую помощь в проведении мониторинга.

Контактное лицо: Маслаков Алексей Алексеевич, *адрес:* 119234, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 12; *e-mail:* alekseymaslakov@yandex.ru

Для цитирования: Маслаков А.А., Рузанов В.Т., Фёдоров-Давыдов Д.Г., Краев Г.Н., Давыдов С.П., Замолотчиков Д.Г., Трегубов О.Д., Шикломанов Н.И., Стрелецкий Д.А. Сезонное протаивание пород в Берингии на фоне современных климатических изменений // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17, № 4. С. 283–294. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.4.283

(Circumpolar Active Layer Monitoring – CALM), материалы исследований на геокриологическом стационаре «Дионисия» (г. Анадырь, Чукотка), а также массив метеорологической информации с действующих метеостанций северо-востока России. Площадки мониторинга расположены в природных условиях, наиболее типичных для окружающих территорий, представляя зональные ландшафты от арктических тундр в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород до северной тайги и южных тундр в области прерывистого распространения мерзлых отложений. Интразональные ландшафты, представленные речной поймой, также включены в исследование. Анализ межгодового хода глубины сезонного протаивания пород и летней температуры воздуха (июнь–сентябрь) выявил общие закономерности и тренды: на большинстве рассматриваемых мониторинговых площадок с 1980–1990-х годов вслед за ростом температур воздуха в теплый период наблюдается увеличение толщины сезонноталого слоя, завершившееся фазой стабилизации в 2000–2010-х годах. Продолжение роста глубины сезонного протаивания почв характерно лишь для некоторых точек Колымской низменности и района Восточной Чукотки (залив Лаврентия), что демонстрирует неоднозначность реакции сезонноталого слоя на изменения внешних воздействий на разных участках. Представленные в работе результаты могут быть использованы для анализа динамики природных условий региона в контексте региональных изменений климата.

Ключевые слова: сезонноталый слой, многолетнемерзлые породы, климатические изменения, Берингия, Колыма, Чукотка, Аляска.

Сезонноталый слой (СТС) образуется в теплый период года в области криолитозоны и занимает промежуточное положение между атмосферой и многолетнемерзлыми отложениями. Через СТС проходит большая часть теплооборотов в земную кору [1], и потому он чутко реагирует на изменения погоды и климата. Высокая степень изученности факторов, определяющих промерзание и протаивание пород: радиационный баланс, температура воздуха, растительность, снежный покров и т. д. – позволяет с высокой достоверностью рассчитывать средние региональные значения толщины СТС [2], однако высокая изменчивость этих факторов в пределах единого ландшафтного уровня приводит к значительным вариациям расчетной глубины сезонного протаивания [3]. На этом фоне фактические полевые данные играют исключительно важную роль в качестве опорных сведений о динамике сезонного протаивания и реакции СТС на вариации климата.

Глубина сезонного протаивания пород чрезвычайно изменчива в пространстве и времени [3, 4]. Ее внутригодовая и многолетняя изменчивость связана с изменениями условий

теплообмена пород с атмосферой, обусловленными прежде всего динамикой климата и эволюцией природных ландшафтов. Анализируя динамику глубин сезонного протаивания пород и среднегодовых температур на подошве СТС, можно выявить общий тренд их изменения, определяемый закономерными причинами – ежегодными флуктуациями температур воздуха, количества осадков и т. д. [4].

Цель статьи – выявление многолетних трендов динамики сезонного протаивания в палеорегионе Берингия на основе анализа и обобщения полевых режимных наблюдений.

Материалы и методы. Работа базируется на результатах исследований, проводимых в рамках программы циркумполярного мониторинга сезонноталого слоя – CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring) [5], а также на основе массива данных, полученных в результате многолетних измерений глубины сезонного протаивания на стационаре «Дионисия» (Чукотка).

Регион исследований. Берингия – это палеогеографическая область, существовавшая как целостный регион в среднем и позднем плей-

стоцене, охватывавший шельф моря Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского и Берингова морей, примыкающие к ним окраинные низменности Северо-Востока Азии и Аляски и окаймляющие их участки низкогорий [6, 7]. Вся эта территория имела общие климатические условия и сходные ландшафты, исторически определившие современное распространение и состояние многолетнемерзлых пород.

В данной работе с точки зрения современной динамики глубин сезонного протаивания рассматриваются 4 района (рис. 1): 1) низовья р. Колымы (Северо-Восточная Якутия); 2) Анадырская низменность (Западная Чукотка); 3) побережье залива Лаврентия (Восточная Чукотка); 4) северо-западная окраина Аляски (мыс Барроу на северо-западе района и полуостров Сьюард на юго-востоке). Все рассматриваемые районы расположены в арктическом и субарктическом климатических

поясах, в области распространения многолетнемерзлых пород. Климатические условия определили здесь формирование тундр и притундровых редколесий.

В пределах тундровой зоны Колымской низменности (район № 1) отчетливо выделяются два сектора – северо-западный и северо-восточный, различающиеся по литологическому составу почвообразующих пород. Северо-западный сектор (площадка CALM R13A, мыс Чукочий) характеризуется распространением пылеватых суглинков верхнеплейстоценовой едомной свиты [8]. Почвы представлены различными подтипами криозема. Северо-восточный сектор соответствует песчаному массиву, занимающему междуречье Колымы и Коньковой (Халерчинская тундра), формирование которого происходило со среднего плейстоцена по голоцен [9]. Большая часть территории занята полигональными болотами, среди

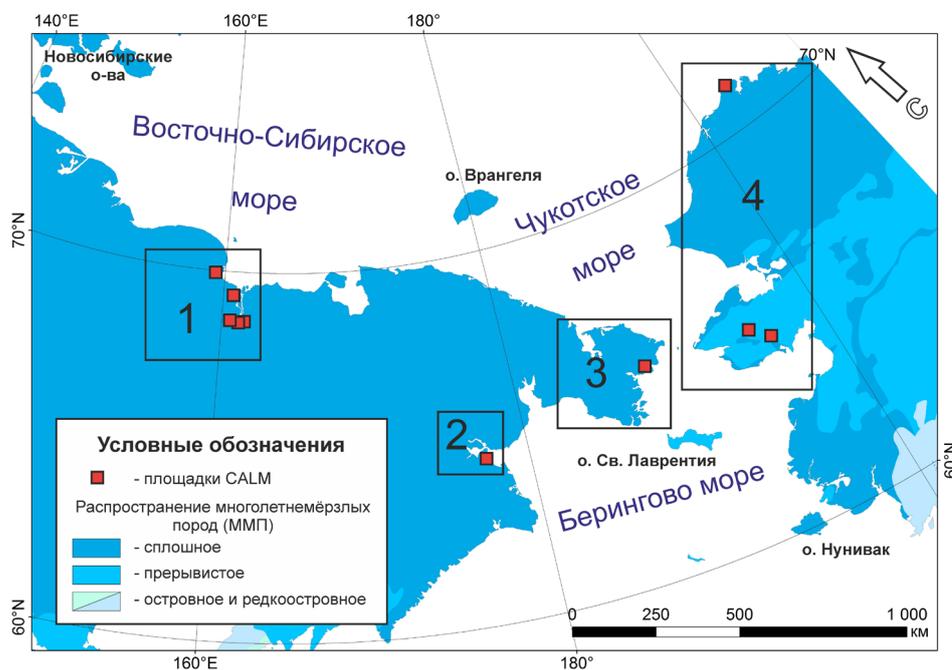


Рис. 1. Районы Берингии, рассматриваемые с точки зрения межгодовой динамики сезонноталого слоя: 1 – низовья р. Колымы (Северо-Восточная Якутия); 2 – район г. Анадыря (Западная Чукотка); 3 – залив Лаврентия (Восточная Чукотка); 4 – мыс Барроу и п-ов Сьюард (северо-запад Аляски)

которых встречаются микроповышения (R21, оз. Ахмело) с зональной тундровой растительностью. На юге песчаного массива распространена лиственничная тайга (R19, оз. Глухое). В почвенном покрове обеих точек преобладают оподзоленные подбуры. Пойменные ландшафты (R17, протока Ахмело) отличаются чрезвычайно высокой фациальной неоднородностью: они включают и относительно дренированные участки прируслового вала, и различные варианты болот.

Геокриологический стационар (полигон) «Дионисия» (район № 2), созданный в 1988 году Анадырской экспедицией ПГО «Севостгеология», находится в 15 км к югу от г. Анадыря [10], на равнинном участке между Анадырским лиманом и горой Дионисия. Стационар насчитывает 12 мониторинговых площадок, 5 из них находятся в нарушенных природных условиях (снят почвенно-растительный слой). Все площадки расположены в пределах пологоволнистой слабоборасчлененной равнины (как на плоских водоразделах, так и в днищах неглубоких котловин), сложенной суглинками и супесью, покрытыми торфом мощностью до 0,7 м. Растительность представлена кочкарными и бугорковатыми кустарничково-мохово-пушицевыми ассоциациями и мохово-осоковыми сообществами тундровых болот в термокарстовых понижениях. Вблизи стационара находится заложенная в 1994 году мониторинговая площадка CALM Онемен – в пределах Анадырской низменности на северном побережье залива Онемен, являющемся пологохолмистой равниной с превышением 5–30 м над урезом воды. Отложения в пределах площадки представлены тонким торфянистым горизонтом (10–20 см), подстилаемым оторфованными супесями. Растительность соответствует типичной мохово-кочкарной тундре.

Мониторинговая площадка CALM Лаврентия (район № 3), заложенная в 2000 году, расположена в 3 км к северо-западу от пос. Лаврентия, в 800 м от берега залива Лаврентия между гольцовым гребнем и плоской морской террасой. Поверхность площадки имеет слабый уклон (2–3°) на северо-восток и абсолют-

ную высоту около 70 м. Отложения площадки – ледниковые валунные суглинки, оторфованные с поверхности. Основная часть площадки представлена влажной осоково-ивовой тундрой с выраженным микрорельефом на торфяных и торфянистых криоземах; на кочках произрастают курстарничково-разнотравные ассоциации [11]. Стоит отметить, что районы стационара «Дионисий» и залива Лаврентия располагаются в ландшафтной подзоне типичных тундр [12].

Мониторинговая площадка Барроу (район № 4) расположена в самых суровых климатических условиях – в области арктических тундр, осложненной полигональным рельефом [13]. В то же время мониторинговые площадки Консил и Кугарок на п-ове Сьюард располагаются в более мягких условиях: здесь, в отличие от остальных участков, распространение многолетней мерзлоты не сплошное, а прерывистое. Растительность характеризуется преобладанием кочкарничково-моховой тундры с небольшими участками кустарничковых ассоциаций, окаймляющих ложбины временных водотоков.

Методы исследования. Полевые измерения глубины сезонного протаивания в рамках программы CALM ведут стандартно по единой методике на всех участках сети мониторинга. Площадка, на которой осуществляют измерения, отражает репрезентативные условия окружающей территории и, как правило, имеет форму квадрата размерами 1×1 км или 100×100 м. Внутри квадрата через каждые 100 или 10 м соответственно обозначены узлы измерительной сетки, т. е. в пределах одной площадки расположена 121 точка для измерений [5]. Каждый год в период максимального сезонного протаивания (август–сентябрь) металлическим щупом с ручками Т-образной формы (диаметром не более 1 см) проводят пенетрацию оттаявшего слоя почвы с повторностью до 5 раз в каждой из точек площадки. Нижний конец щупа, достигая подошвы СТС (отмечают по характерному отчетливому возрастанию твердости пород), измеряет его толщину, округляемую до сантиметров. Полученные

данные усредняют и вносят в соответствующую базу данных².

Измерения глубины сезонного протаивания на стационаре «Дионисия» проводят по методике Всероссийского научно-исследовательского института гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО)³, принципиально отличающейся от вышеописанных тем, что измерения имеют 5-кратную повторность, а размеры площадок и количество точек измерений могут варьировать (25×25, 10×40 м и т. д.).

Камеральную обработку результатов проводили в программном пакете «MS Excel», определяли средние, максимальные и минимальные значения, стандартные отклонения, а также строили графики и линии тренда. Для проверки гипотез, в частности определения значимости линий тренда, при малом объеме выборки использовали *t*-распределение Стью-

дента. Критическим уровнем значимости в данном случае был установлен $p = 0,01$.

Результаты. Известно [3], что ведущую роль в процессе сезонного протаивания играет температура воздуха на протяжении теплого периода года. Анализ долгосрочных метеорологических рядов по метеостанциям северо-востока России показал (рис. 2), что на протяжении большей части XX века температуры летних сезонов колебались с амплитудой 0,5–1 °С и периодичностью 7–15 лет, не имея направленного тренда⁴. С 1990-х годов наблюдался резкий рост летних температур воздуха, превысивших средневековые значения. Для метеостанции Провидения этот скачок перешел в фазу стабилизации к началу 2000-х годов, в то время как для других метеостанций повышение температур продолжалось и замедление наступило только к 2010-м годам. По данным

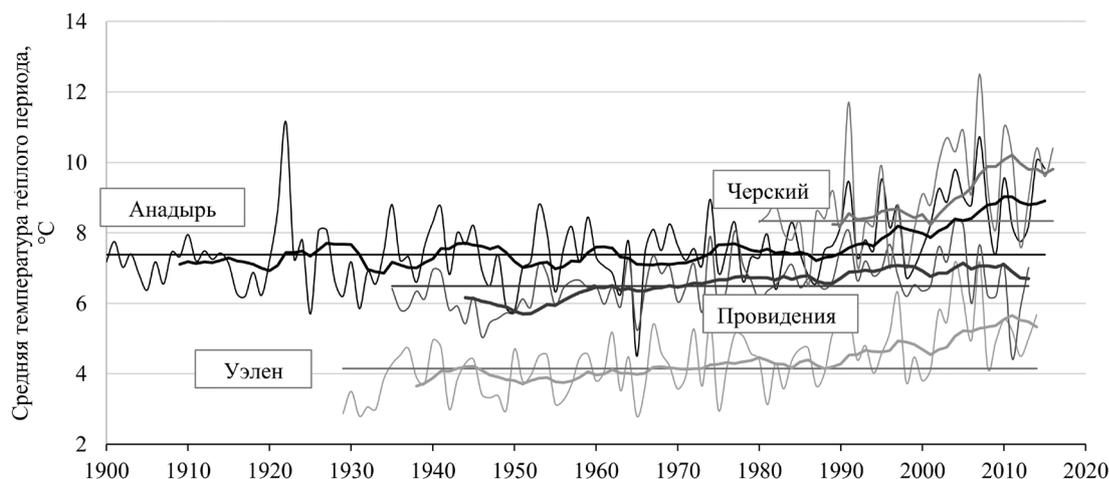


Рис. 2. Среднегодовые температуры теплых периодов (июнь–сентябрь) по метеостанциям Чукотки (Анадырь, Провидения и Уэлен) и Восточной Якутии (Черский) в XX–XXI веках. Жирными кривыми обозначены скользящие кривые по десятилетиям, прямыми — средние значения температур за XX век

²База данных программы циркумполярного мониторинга деятельного слоя CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring). URL: <https://www2.gwu.edu/~calm/> (дата обращения: 14.06.2017).

³Методические рекомендации по стационарному изучению криогенных физико-геологических процессов / сост.: Г.Ф. Гравис, С.Е. Гречищев, В.Л. Невечера [и др.]. М., 1979. 72 с.

⁴Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. URL: <http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных> (дата обращения: 14.06.2017).

метеостанции Черский, увеличение летних и среднегодовых температур, имевшее место с конца 1990-х годов, в 2008 году сменилось чередованием годов с теплыми и холодными летними сезонами.

На территории Колымской низменности (район № 1) исследования динамики глубины сезонного протаивания почв в рамках программы CALM ведутся с 1996 года. Анализ межгодовой изменчивости мощности СТС на площадках, имеющих наиболее длительные ряды наблюдений (рис. 3), показал, что на рубеже XX–XXI ве-

зывает аналогичный тренд (рис. 4): мощность СТС росла с конца 1980-х годов, замедлялась к началу 2000-х годов и, согласно линии тренда, достигала максимальных значений в 2000–2005 годах, после чего наблюдалось медленное уменьшение значений. Сопоставление межгодовой изменчивости толщины СТС с динамикой летних температур воздуха показывает, что увеличение глубины сезонного протаивания почв следовало за повышением температуры воздуха до 1998–2003 годов, а затем глубина протаивания стабилизировалась, несмотря на

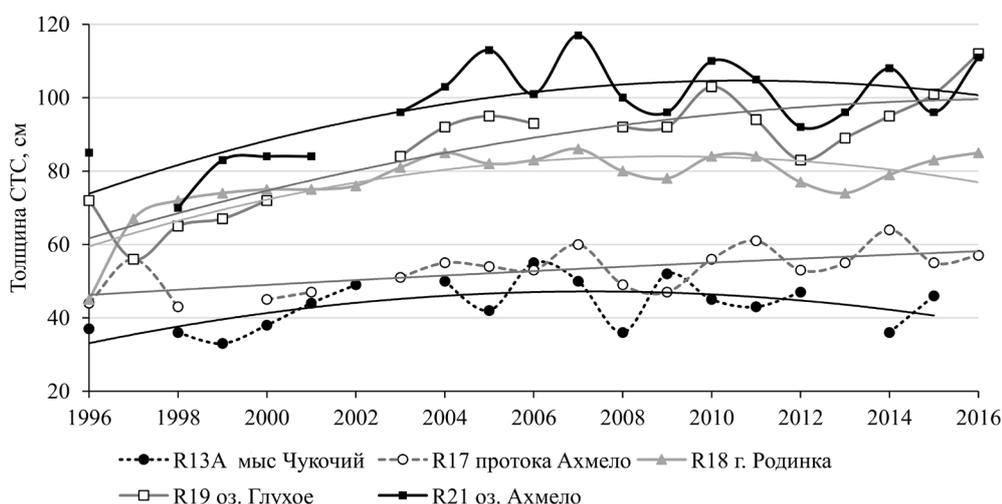


Рис. 3. Межгодовая динамика глубин и тренды сезонного протаивания на площадках CALM в низовьях р. Колымы (Северо-Восток Якутии) за 1996–2016 годы

ков наблюдался положительный тренд глубины протаивания почв со скоростью 1,4–3,4 см/год. Для большинства изучаемых ландшафтов от года к году имел место прирост мощности СТС даже при близких среднелетних значениях температуры, однако наибольшие значения коэффициента аппроксимации (R^2) имеют массивы данных с полиномиальными линиями тренда, определяющими период стабилизации глубины протаивания вслед за ее ростом.

Динамика глубин сезонного протаивания на стационаре «Дионисия» (район № 2) пока-

продолжающееся потепление климата [10]. На площадке Онемен наблюдалась аналогичная картина – рост глубин сезонного протаивания в конце 1990-х годов, завершившийся фазой относительной стабилизации.

Межгодовые флуктуации толщины СТС на площадках Лаврентия, Кугарок и Консил, расположенных на побережье Берингова пролива (районы № 3 и 4), демонстрируют временную асинхронность (рис. 5), даже несмотря на близкое географическое расположение площадок.

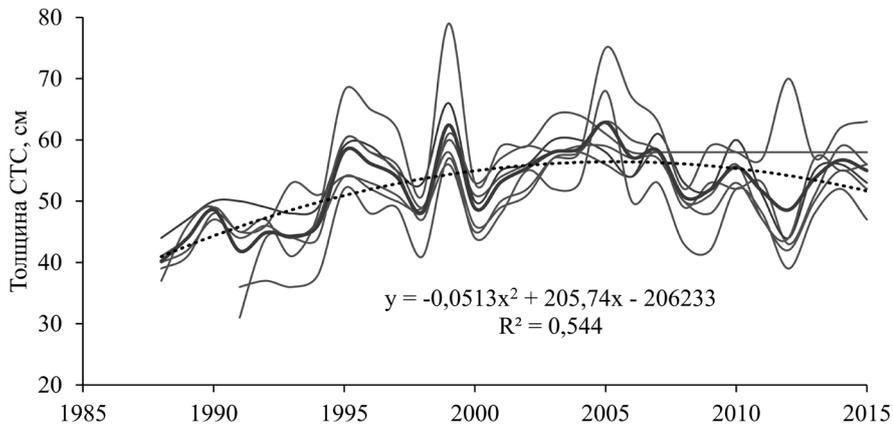


Рис. 4. Межгодовая динамика глубин сезонного протаивания пород на мониторинговых площадках стационара «Дионисия» за 1988–2015 годы. Толстая кривая характеризует динамику средних значений мощности СТС по площадкам. Пунктирной линией обозначена линия тренда

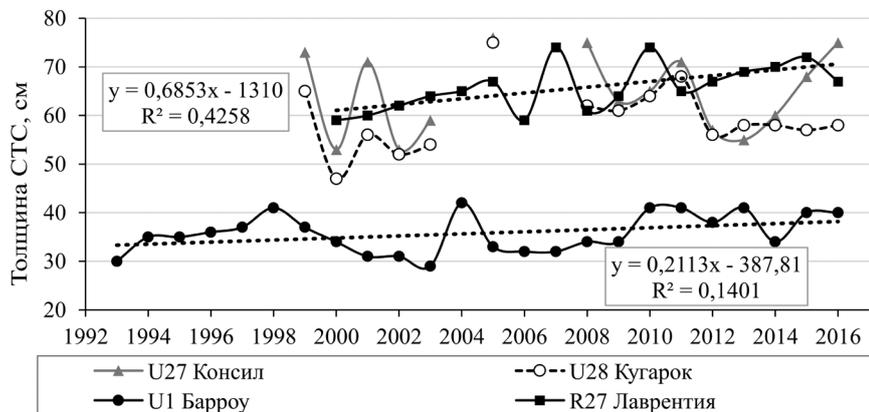


Рис. 5. Межгодовая динамика глубин и тренды сезонного протаивания на площадках CALM: на берегу залива Лаврентия (R27, Лаврентия, Восточная Чукотка) за 2000–2016 годы, вблизи м. Барроу (U1, Барроу, север Аляски) за 1993–2016 годы и на п-ове Сьюард (U27-U28, Консил и Кугарок, Западная Аляска) за 1999–2016 годы

Площадка Лаврентия демонстрирует уверенный рост толщины СТС со скоростью около 0,7 см/год, в то время как для площадок Консил и Кугарок, ввиду большой вариабельности значений глубин сезонного протаивания и значительного перерыва в наблюдениях, пред-

ставляются весьма сложными и статистически необоснованными построение и анализ каких-либо линий тренда. Однако сравнение средней мощности СТС за периоды 2008–2016 и 1999–2003 годов демонстрирует разницу в 3,6 и 5,4 см для площадок Консил и Кугарок соот-

ветственно, что может свидетельствовать об относительном росте глубин сезонного протаивания почв этого района в пределах рассматриваемого периода.

Измерения мощности СТС на самой северной из рассматриваемых площадок – U1, Барроу (см. рис. 1, 5, район № 4, северная часть) – ведутся с перерывами с 1960-х годов [13]. Мониторинг выявил рост глубин сезонного протаивания в 1990-е годы, сменившийся периодами его стабилизации (1999–2009) и дальнейшего роста (2010–2016). Общий тренд динамики СТС на площадке положительный.

Обсуждение. Как было описано выше, все мониторинговые площадки Восточной Якутии и Западной Чукотки демонстрируют межгодовую динамику толщины СТС, близкую к полиномиальной линии тренда. Для полинома II степени пиковое значение, т. е. отметка на оси x , где рост функции сменяется ее падением, вычисляется по формуле

$$y_0 = \frac{-b}{2a},$$

где a и b – коэффициенты при x^2 и x соответственно.

С использованием этого уравнения были определены временные точки (в прошлом или будущем) смены периодов роста мощности СТС периодами ее стабилизации (см. таблицу).

Для большинства рассматриваемых ландшафтов Колымской низменности смена тенденции, согласно имеющимся данным, произошла во второй половине 2000-х годов (R21, оз. Ахмело) или на рубеже первого и второго десятилетий XXI века (R13А, м. Чукочий и R18, гора Родинка). Для точки R19 (оз. Глухое) она должна произойти в 2017–2018 годах, а для R17 (протока Ахмело) при сохранении тренда – лишь в 2059 году. При этом для экосистем с песчаными почвами (R19 и R21) стабилизация мощности СТС наступила или предположительно наступит на уровне существенно более высоких значений по сравнению с периодом начала наблюдений, а для зональных экосистем с суглинистыми почвами (R13А и R18) суммарный прирост этой величины за годы мониторинга оказался сравнительно невелик. Большая стабильность деятельного слоя на водоразделах и пологих склонах, сложенных породами едомной свиты, может быть связана с наличием высокольдистого самовоспроизводящегося покровного горизонта [14]. Для средних значений глубины протаивания по площадкам стационара «Дионисия» межгодовой рост сменился падением в 2005 году.

Представленные тренды могут не отражать точной картины межгодовой динамики СТС, поскольку для большинства площадок существуют перерывы в измерениях. Тем не менее

**ТРЕНДЫ СЕЗОННОГО ПРОТАИВАНИЯ ПОРОД
ДЛЯ НЕКОТОРЫХ МОНИТОРИНГОВЫХ ПЛОЩАДОК САЛМ НИЗОВИЙ р. КОЛЫМЫ
И СТАЦИОНАРА «ДИОНИСИЯ» (ЧУКОТКА) ЗА 1996–2016 ГОДЫ**

Площадка	Уравнение линии тренда	Коэффициент аппроксимации (R^2)	Пиковые годы согласно тренду
R13А (мыс Чукочий)	$y = -0,1422x^2 + 571,81x - 574773$	0,546	2010–2011
R19 (оз. Глухое)	$y = -0,0846x^2 + 341,38x - 344219$	0,758	2017–2018
R18 (гора Родинка)	$y = -0,1449x^2 + 582,36x - 584907$	0,660	2009–2010
R17 (протока Ахмело)	$y = -0,0055x^2 + 22,648x - 23261$	0,400	2059
R21 (оз. Ахмело)	$y = -0,1108x^2 + 444,66x - 446232$	0,368	2006–2007
Стационар «Дионисия» (среднее значение по площадкам за 1988–2016 годы)	$y = -0,0513x^2 + 205,74x - 206233$	0,544	2005

t -распределение Стьюдента, используемое для проверки гипотез при малом объеме выборки, показало уровень значимости $p < 0,01$, что делает вышеуказанные тренды статистически значимыми.

Коэффициент a в квадратном уравнении линий тренда определяет скорость изменения глубин сезонного протаивания во времени: чем он больше в абсолютном значении ($|a|$), тем быстрее происходят нарастание и спад глубин. В обозначенных трендах $|a|$ варьирует от 0,005 до 0,14, т. е. разница между скоростями реакции мощности СТС на климатические изменения достигает 3 раз, в зависимости от площадки. Такие различия вызваны в первую очередь так называемым эдафическим фактором, определяющим теплофизические свойства поверхности и толщи оттаивающего грунта [15] и уникальным для каждой площадки. Он зависит прежде всего от ландшафтных и микроландшафтных условий площадки, рельефа, характера растительности, гранулометрического состава и строения профиля почв, влажности/льдистости слоя сезонного протаивания.

Таким образом, сравнивая межгодовую динамику мощности СТС на рубеже XX–XXI веков для рассматриваемых секторов Берингии, можно выявить общие закономерности. На севере Аляски (мыс Барроу) период увеличения мощности СТС наблюдался раньше всего. Он пришелся на 1990-е годы и, после 10-летнего

периода относительной стабилизации, продолжился с 2009 года. Большинство изучаемых мониторинговых площадок демонстрируют рост глубин сезонного протаивания на рубеже XX–XXI столетий, заканчивающийся к 2010-м годам и сменяющийся фазой стабилизации. Продолжение роста глубины сезонного протаивания почв характерно лишь для некоторых точек Колымской низменности (R17, протока Ахмело и R19, оз. Глухое), севера Аляски (U1, Барроу) и района Восточной Чукотки. Принимая во внимание цикличность межгодовых вариаций глубин сезонного протаивания, идущих вслед за вариациями температуры воздуха [4], следует предположить дальнейший спад темпов роста мощности СТС в указанных регионах и наступление фазы его возможного сокращения в 2020–2030-х годах. Однако, учитывая ансамблевые прогнозы изменения климата [16], уверенно говорить о будущем изменении глубины СТС следует только с учетом возможного изменения локальных и глобальных природных, в первую очередь климатических, условий.

Таким образом, на примере отдельного региона Берингии была показана неоднозначность реакции СТС на изменения климата на разных участках, что обуславливает необходимость проведения дальнейших детальных мониторинговых наблюдений и поиска взаимосвязей между глубиной сезонного протаивания и ландшафтно-микrokлиматическими параметрами.

Список литературы

1. Павлов А.В. Теплообмен промерзающих и протаивающих грунтов с атмосферой. М.: Наука, 1965. 254 с.
2. Anisimov O.A., Shiklomanov N.I., Nelson F.E. Global Warming and Active-Layer Thickness: Results from Transient General Circulation Models // *Global and Planetary Change*. 1997. Vol. 15, iss. 3–4. P. 61–77.
3. Hinkel K.M., Nelson F.E. Spatial and Temporal Patterns of Active Layer Thickness at Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) Sites in Northern Alaska, 1995–2000 // *Journal of Geophysical Research*. 2003. Vol. 108, iss. D2, 8168. DOI: 10.1029/2001JD000927
4. Пармузин С.Ю., Шаталова Т.Ю. Динамика сезонноталого и сезонномерзлого слоев пород в связи с короткопериодными колебаниями климата // *Основы геокриологии*. Ч. 4. Динамическая геокриология / под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 2001. С. 284–303.
5. 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, iss. 3. P. 165–258.

6. Шер А.В. Роль Берингийской суши в формировании фауны млекопитающих Голарктики в позднем кайнозое // Берингия в кайнозое. Владивосток: ДНЦ АН СССР, 1976. С. 227–241.
7. Юрцев Б.А. Проблемы позднекайнозойской палеогеографии Берингии в свете ботанико-географических данных // Берингия в Кайнозое. Владивосток: ДНЦ АН СССР, 1976. С. 101–120.
8. Архангелов А.А. Подземное оледенение севера Колымской низменности в позднем кайнозое // Проблемы криолитологии. Вып. VI. М.: Изд-во МГУ, 1977. С. 26–57.
9. Спектор В.Б. Четвертичные отложения Приморской низменности (Халлерчинская тундра) // Кайнозой Восточной Якутии. Якутск: Якут. фил. СО АН СССР, 1980. С. 87–97.
10. Рузанов В.Т. Результаты геотермического мониторинга на стационаре Дионисия (Чукотка) // Арктика. Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы: тр. междунар. конф. (г. Тюмень, 2–5 июля 2015 г.). Тюмень: Эпоха, 2015. С. 329–332.
11. Zamolodchikov D.G., Kotov A.N., Karelin D.V., Razzhivin V.Yu. Active-Layer Monitoring in Northeast Russia: Spatial, Seasonal, and Interannual Variability // Polar Geography. 2004. Vol. 28, iss. 4. P. 286–307.
12. Исаченко А.Г. Ландшафты СССР. Л.: Изд-во ЛГУ, 1985. 320 с.
13. Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A., Nelson F.E., Hollister R.D., Romanovsky V.E., Tweedie C.E., Bockheim J.G., Brown J. Decadal Variations of Active-Layer Thickness in Moisture-Controlled Landscapes, Barrow, Alaska // Journal of Geophysical Research. 2010. Vol. 115, iss. G00104. DOI: 10.1029/2009JG001248
14. Shur Yu.L. The Upper Horizon of Permafrost Soils. Permafrost // Proc. 5th Inter. Conf. on Permafrost. Trondheim, Norway, 1988. P. 867–871.
15. Nelson F.E., Outcalt S.I. A Computational Method for Prediction and Regionalization of Permafrost // Arctic and Alpine Research. 1987. № 3. P. 279–288.
16. Final Draft Underlying Scientific-Technical Assessment // IPCC 5th Assessment Report (AR5). Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Stockholm, Sweden, 2013. 2216 p.

References

1. Pavlov A.V. *Teploobmen promerzayushchikh i protaivayushchikh gruntov s atmosferoy* [Heat Exchange of Freezing and Thawing Soils with the Atmosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 254 p. (In Russ.)
2. Anisimov O.A., Shiklomanov N.I., Nelson F.E. Global Warming and Active-Layer Thickness: Results from Transient General Circulation Models. *Global and Planetary Change*, 1997, vol. 15, iss. 3-4, pp. 61–77.
3. Hinkel K.M., Nelson F.E. Spatial and Temporal Patterns of Active Layer Thickness at Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) Sites in Northern Alaska, 1995–2000. *Journal of Geophysical Research*, 2003, vol. 108, iss. D2, 8168. DOI: 10.1029/2001JD000927
4. Parmuzin S.Yu., Shatalova T.Yu. Dinamika sezonnotalogo i sezonnomerzlogo sloev porod v svyazi s korotkoperiodnymi kolebaniyami klimata [Dynamics of Seasonally Thawed and Frozen Soil Layers Due to the Short-Period Climate Fluctuations]. *Osnovy geokriologii. Ch. 4. Dinamicheskaya geokriologiya* [Fundamentals of Geocryology. Part 4. Dynamic Geocryology]. Ed. by E.D. Ershov. Moscow, MSU Publ., 2001, pp. 284–303. (In Russ.)
5. 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, iss. 3, pp. 165–258.
6. Sher A.V. Rol' Beringiyskoy sushi v formirovanii fauny mlekopitayushchikh Golarkтики v pozdnem kaynozoe [The Role of the Beringia Land in the Formation of Mammalian Fauna of the Holarctic in the Late Cenozoic]. *Beringiya v Kaynozoe* [Beringia in Cenozoic]. Vladivostok, DSC of the USSR Academy of Sciences Publ., 1976, pp. 227–241. (In Russ.)
7. Yurtsev B.A. Problemy pozdnemkaynozoyской paleogeografii Beringii v svete botaniko-geograficheskikh dannykh [Problems of the Late Cenozoic Paleogeography of Beringia in the Light of Botanical and Geographical Data]. *Beringiya v Kaynozoe* [Beringia in the Cenozoic]. Vladivostok, DSC of the USSR Academy of Sciences Publ., 1976, pp. 101–120. (In Russ.)
8. Arkhangelov A.A. Podzemnoe oledenenie severa Kolymской nizmennosti v pozdnem kaynozoe [Underground Glaciation of the North of the Kolyma Lowland in the Late Cenozoic]. *Problemy kriolitologii. Вып. VI* [Problems of Cryolithology. Iss. 6]. Moscow, MSU Publ., 1977, pp. 26–57. (In Russ.)

9. Spektor V.B. Chetvertichnye otlozheniya Primorskoj nizmennosti (Khallerchinskaya tundra) [Quaternary Sediments of the Primorsky Lowland (the Hallerchinskaya Tundra)]. *Kaynozoy Vostochnoy Yakutii* [The Cenozoic of Eastern Yakutia]. Yakutsk, YakSC SB AS of the USSR Publ., 1980, pp. 87–97. (In Russ.)
10. Ruzanov V.T. Rezul'taty geotermicheskogo monitoringa na stacionare Dionisiya (Chukotka) [Results of Geothermal Monitoring at the Dionisiya Station (Chukotka)]. *Arktika. Subarktika: mozaichnost', kontrastnost', variativnost' kriosfery: tr. mezhdunar. konf. (g. Tyumen', 2-5 iyulya 2015 g.)* [The Arctic. The Subarctic: Mosaic, Contrast, Variability of the Cryosphere: Proc. Inter. Conf. (Tyumen, July 2-5, 2015)]. Tyumen, Epokha Publ., 2015, pp. 329–332. (In Russ.)
11. Zamolodchikov D.G., Kotov A.N., Karelin D.V., Razzhivin V.Yu. Active-Layer Monitoring in Northeast Russia: Spatial, Seasonal, and Interannual Variability. *Polar Geography*, 2004, vol. 28, iss. 4, pp. 286–307.
12. Isachenko A.G. *Landshafty SSSR* [Landscapes of the USSR]. Leningrad, LSU Publ., 1985. 320 p. (In Russ.)
13. Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A., Nelson F.E., Hollister R.D., Romanovsky V.E., Tweedie C.E., Bockheim J.G., Brown J. Decadal Variations of Active-Layer Thickness in Moisture-Controlled Landscapes, Barrow, Alaska. *Journal of Geophysical Research*, 2010, vol. 115, iss. G00104. DOI: 10.1029/2009JG001248
14. Shur Yu.L. The Upper Horizon of Permafrost Soils. *Permafrost. Proc. 5th Inter. Conf. on Permafrost*. Trondheim, Norway, 1988, pp. 867–871.
15. Nelson F.E., Outcalt S.I. A Computational Method for Prediction and Regionalization of Permafrost. *Arctic and Alpine Research*, 1987, no. 3, pp. 279–288.
16. Final Draft Underlying Scientific-Technical Assessment. *IPCC 5th Assessment Report (AR5). Climate Change 2013: the Physical Science Basis*. Stockholm, Sweden, 2013. 2216 p.

DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.4.283

Received on June 15, 2017

Aleksey A. Maslakov*, **Vladimir T. Ruzanov****, **Dmitriy G. Fedorov-Davydov*****, **Gleb N. Kraev******,
Sergey P. Davydov*****, **Dmitriy G. Zamolodchikov*******,
Oleg D. Tregubov**, **Nikolay I. Shiklomanov*******, **Dmitriy A. Streletskiy*******

*Lomonosov Moscow State University
(Moscow, Russian Federation)

**Chukotka Branch of North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute
named after N.A. Shilo, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
(Chukotka Autonomous Okrug, Anadyr, Russian Federation)

***Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science of the Russian Academy of Sciences
(Pushchino, Moscow region, Russian Federation)

****Centre of Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences
(Moscow, Russian Federation)

*****North-Eastern Scientific Station of Pacific Geographical Institute,
Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
(Republic of Sakha (Yakutia), Chersky village, Russian Federation)

*****George Washington University
(Washington, USA)

SEASONAL THAWING OF SOILS IN THE BERINGIA REGION IN CHANGING CLIMATIC CONDITIONS

The paper presents the results of long-term observations for the dynamics of seasonal thawing of soils in various parts of the Beringia Paleo-region: the Kolyma and Anadyr Lowlands, the coast of the Gulf of Saint Lawrence, the Seward Peninsula and Point Barrow. The factual data are the field

measurements, conducted in the framework of the Circumpolar Active Layer Monitoring program (CALM), study materials at the Dionisiya field permafrost station (Anadyr, Chukotka), and an array of information from the operating meteorological stations of the northeast of Russia. Monitoring sites are located in natural conditions, typical for the surrounding areas, representing zonal landscapes from the arctic tundra in continuous permafrost to the northern taiga and southern tundra in sporadic permafrost. Intrazonal landscapes represented by the river floodplain are also included in the study. The analysis of interannual fluctuations of the depth of seasonal soil thawing and summer air temperatures (June–September) revealed common patterns and trends: the majority of considered monitoring sites since 1980–1990 demonstrated the increase of active layer thickness, followed by the increase in summer air temperatures. This period ended by the stabilization phase in 2000–2010. The growth of the active layer thickness is characteristic only of some sites of the Kolyma Lowland and the East Chukotka region (the Gulf of Saint Lawrence), which demonstrates the ambiguous response of the active layer to the environment changes. The results presented in this paper can be used for the analysis of the dynamics of the regional natural conditions in the context of regional climate change.

Keywords: *active layer, permafrost, climatic change, Beringia, Kolyma, Chukotka, Alaska.*

Corresponding author: Aleksey Maslakov, *address:* MPO-1, Leninskie Gory, 1, stroenie 12, Moscow, 119234, Russian Federation; *e-mail:* alekseymaslakov@yandex.ru

For citation: Maslakov A.A., Ruzanov V.T., Fedorov-Davydov D.G., Kraev G.N., Davydov S.P., Zamolodchikov D.G., Tregubov O.D., Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A. Seasonal Thawing of Soils in the Beringia Region in Changing Climatic Conditions. *Arctic Environmental Research*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 283–294. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.4.283