

УДК 551.345

ПОСТПИРОГЕННАЯ ДИНАМИКА ГИДРОТЕРМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ КРИОЛИТОЗОНЫ ЯКУТИИ**Варламов С.П., Скрябин П.Н.***ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова» СО РАН,
Якутск, e-mail: vsp@mpi.ysn.ru*

Рассмотрено современное тепловое состояние многолетнемерзлых пород в естественных и постпирогенных условиях в Центральной Якутии. Экспериментально выявлено значительное увеличение в естественных условиях глубины сезонного протаивания и повышение температуры грунтов в слое годовых теплооборотов, в зависимости от сочетания аномального повышения среднегодовых температур воздуха и аномального увеличения осадков. Этот фактор способствует развитию термокарста и термоэрозии, заболачиванию территорий, повышению уровней зеркала воды озер и надмерзлотных вод сезонноталого слоя, затоплению сухих озерных котловин. Установлено значительное оттаивание пород ледового комплекса и формирование таликовых зон на пирогенных лесных территориях. Количественно оценено увеличение воды при протаивании многолетнемерзлых пород после лесных пожаров. Выявлено, что пирогенез является одним из факторов усиления обводненности региона за последние годы.

Ключевые слова: Центральная Якутия, криолитозона, лесные пожары, термический режим грунтов, глубина протаивания

POST-FIRE CHANGES IN THE HYDROTHERMAL STATE OF PERMAFROST IN YAKUTIA**Varlamov S.P., Skryabin P.N.***Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, e-mail: vsp@mpi.ysn.ru*

This study discusses the current thermal state of permafrost in Central Yakutia, in undisturbed settings and after forest fires. The results of field observations indicate significant increases in seasonal thaw depth, as well as in permafrost temperature in undisturbed areas, depending on the combination of warmer than normal mean annual air temperature and anomalously higher precipitation. This factor promotes the development of thermokarst and thermal erosion, paludification, rising of the lake and suprapermafrost groundwater levels, and filling of the dry lake basins. In forest areas affected by forest fires, observations show significant thawing of the ice complex and the development of talik zones. An assessment was made of the quantity of water released from permafrost thawing due to forest fires. The study suggests that forest fires are one of the factors responsible for enhanced water-logging in recent years.

Keywords: Central Yakutia, permafrost, forest fires, ground thermal regime, thaw depth

В Якутии расширяется строительство трубопроводов, железных и автомобильных дорог, линий электропередач, которое неизбежно сопровождается значительными нарушениями природных условий. Техногенные воздействия различного типа и масштаба (вырубка леса, пожары, удаление напочвенных покровов и т.д.) приводят к изменению геокриологических условий, в том числе гидротермического режима грунтов, развитию негативных криогенных процессов (термопросадка, новообразование, деградация мерзлых толщ и т.д.), осложняющих рациональное природопользование. Температурный режим грунтов является одной из основных характеристик, определяющих устойчивость природно-технических систем. Устойчивость мерзлотных ландшафтов к антропогенным воздействиям определяется их термическим состоянием и льдонасыщенностью, литогенным составом, глубиной сезонного протаивания.

Материалы и методика исследований

На территории Республики Саха по данным «Государственного доклада...» разных лет с 1998 по 2014 гг. пожары охватили 64 404,26 км² общей площади, в том числе лесной – 50 411,88 км², что соответственно составляет 2,5% от общей площади земель лесного фонда и 3,2% от площади покрытой лесной растительностью и нанесли существенный экономический ущерб [2]. В отдельные годы площадь лесного фонда, пройденного огнем, достигает 12 694 км² (табл. 1).

Основные причины возникновения лесных пожаров (до 60%) обусловлены жизнедеятельностью человека (сельхозпалы, охота, лесозаготовки и пр.). Лесные природные пожары, возникающие из-за сухих гроз при определенных метеоусловиях июля, августа, составляют около 24%. Доля пожаров по неустановленным причинам не превышает 14%. Прослеживается четкая связь возникновения лесных пожаров от сочетания теплоресурсов, влаги летнего сезона и особенностей снегонакоплений.

Наибольшее количество пожаров, превышающих 500 случаев за летний сезон, отмечен в 1998, 2001–2002 гг., характеризующихся малыми летними осадками (80–150 мм), маломощными снежными

покровами (0,18–0,31 м). Наименьшее количество пожаров, не превышающее 80–130 случаев, зафиксировано в летние сезоны 2007, 2011 гг. с обильными осадками (130–190 мм) и мощными снегоотложениями (0,35–0,48 м).

периода (середина сентября) с помощью металлического шупа и ручного бура.

Мониторинговые исследования предусматривают обследование ландшафтов, проведение наблюдений за факторами, определяющими термический

Таблица 1

Сведения о количестве лесных пожаров, площади лесного фонда, пройденного огнем с 1998 по 2014 годы по Республике Саха

Годы	Количество пожаров	Общая площадь (км ²)	в том числе		Средняя площадь одного пожара (км ²)
			лесной (км ²)	нелесной (км ²)	
1998	563	1 541,67	921,84	619,83	2,74
1999	414	271,73	195,72	76,00	0,66
2000	260	128,34	88,81	39,52	0,49
2001	596	6 736,86	4 805,27	1 931,58	11,30
2002	818	7 749,34	5 364,75	2 384,59	9,47
2003	587	1 332,89	829,94	502,95	2,27
2004	200	114,05	94,16	19,89	0,57
2005	263	4 689,94	3 352,48	1 337,46	12,74
2006	206	625,39	497,37	128,02	3,03
2007	81	60,73	53,55	7,18	0,75
2008	307	5 304,92	5 128,87	176,05	17,28
2009	223	2 372,40	2 300,12	72,28	10,64
2010	131	1 046,00	872,00	174,00	7,98
2011	511	9 716,00	8 096,00	1 620,00	19,01
2012	342	1 889,00	1 576,00	313,00	5,52
2013	390	8 131,00	6 743,00	1 388,00	20,85
2014	306	12 694,00	9 495,00	3 199,00	41,48
Итого:	6198	64404,26	50411,88	13989,35	10,39

Исследования термического режима грунтов, проводимые авторами с 1987 г., позволяют количественно оценить его постпирогенную (послепожарную) изменчивость. В статье использованы материалы геотемпературного мониторинга на северном участке железной дороги Томмот – Якутск и в полосе прокладки газопровода Таас Тумус – Якутск.

Исследования проводятся в соответствии с требованиями методики физико-географического сравнения (или природных аналогий) на основе организации длительных натурных наблюдений [3].

Районы работ характеризуются сложными геокриологическими условиями: распространением многолетнемерзлых пород, наличием водоносных таликов, развитием повторно-жильных льдов. Комплексные исследования в пирогенных ландшафтах выполняются в пяти типах местности на 32 ключевых участках, которые составили соответственно: в низкотеррасовом – 1, песчано-грядовом – 19, межгрядово-низинном – 7, межлассном – 4 и плакорном – 1. Объектами исследований являются грунты слоя годовых теплооборотов до глубины 10–15 м. Основными общепринятыми индикаторами изменения термического режима верхних горизонтов криолитозоны являются глубина сезонного протаивания (ξ) и среднегодовая температура грунтов на глубине 10 м (t_0). В качестве датчиков температуры грунтов используются полупроводниковые терморезисторы ММТ-4 с точностью измерений 0,1 °С. Глубина сезонного протаивания грунтов определяется в конце теплого

режим грунтов (высота и плотность снега, строение, свойства, протаивание и температура грунтов, теплопроводность напочвенных покровов, криогенные процессы). Систематические комплексные наблюдения проводятся с периодичностью 4 раза в год (март, июнь, сентябрь, декабрь).

Результаты исследования и их обсуждение

Типы лесов и напочвенных покровов по классам пожарной опасности в низкотеррасовом, межлассном и плакорном типах местности относятся к высокопожароопасным, в песчано-грядовом – к очень высокопожароопасным, в межгрядово-низинном – к среднепожароопасным.

Основными факторами, обуславливающими изменения t_0 и ξ на гарях, являются: уничтожение теплоизолирующего напочвенного покрова, малая отражательная способность поверхности, повышенная влажность грунтов за счет прекращения транспирации влаги растительностью.

В Центральной Якутии со второй половины 60-х годов прошлого века, по оценке Ю.Б. Скачкова [4], наблюдается один из

наиболее высоких в России трендов повышения среднегодовой температуры воздуха ($0,08^{\circ}\text{C}/\text{год}$). Анализ метеорологических факторов показал, что за период мониторинговых наблюдений (1981–2015 гг.) четко выделяются 27 зим с температурами воздуха выше нормы, 7 аномально теплых летних сезонов. Анализ среднезимних температур воздуха показывает, что 12 зим были близкими к норме, 7 – теплыми, 6 – аномально теплыми и только 6 – аномально холодными. По снегонакоплению выявлены следующие зимы: 4 – аномально многоснежные, 6 – многоснежные, 6 – аномально малоснежные, 8 – малоснежные, 11 – нормальные. В естественных условиях в различных типах местности наиболее низкие и высокие температуры грунтов отмечены соответственно в аномально малоснежный 2002/03 и аномально многоснежный 2006/07 гидрологические годы. На этом фоне глубина сезонного протаивания в естественных ландшафтах остается достаточно стабильной и многолетняя динамика теплового состояния слоя годовых теплооборотов ха-

рактеризуется относительной термической устойчивостью, несмотря на значительные короткопериодные межгодовые колебания [1 и 5]. Основным регулятором термического режима грунтов является режим снегонакопления и его межгодовая изменчивость. В 2005–2007 гг. происходили значительные изменения элементов климата (многоснежность и раннее образование снежного покрова, влажные летние сезоны) и гидрологических условий (многоводность весенних талых вод), что привело к аномальному повышению среднегодовых температур в слое годовых теплооборотов (рис. 1). В эти годы на заболоченных и обводненных участках отрицательных форм рельефа отмечены резкое увеличение глубины сезонного протаивания и заметное повышение температуры грунтов. Так в мелководном типе местности, в районе скважины С-11/87, глубина сезонного протаивания в 2007 г. увеличилась по сравнению с предыдущим сезоном на 0,55 м и по сравнению с 1987 г. возросла почти в 3 раза и достигла 1,5 м (рис. 2). Здесь верхний горизонт до 0,40 м

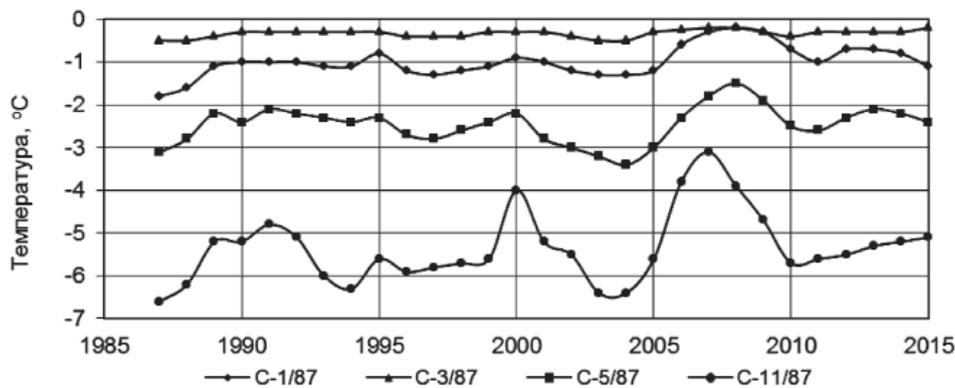


Рис. 1. Динамика среднегодовой температуры грунтов на подошве слоя годовых теплооборотов (глубина 10 м) в песчано-грядовом (С-3/87 – мертвопокровно-толокнянковые сосняки), межгрядово-низинном (С-1/87 – мохово-багульниковые сосново-лиственничники и С-5/87 – мохово-багульничья ерниковая западина) и мелководном (С-11/87 – осоково-сфагновые ерники) типах местности

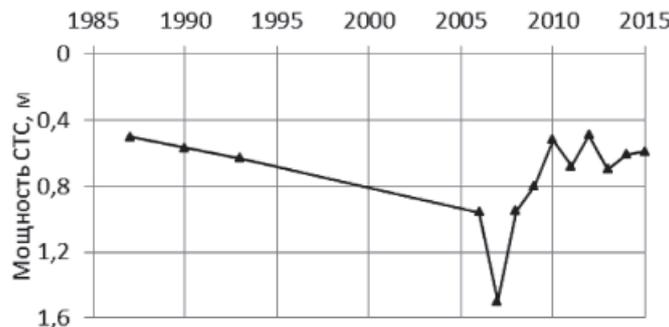


Рис. 2. Динамика мощности сезонного талого слоя в мелководном типе местности С-11/87

представлен сильнольдистым торфом, от 0,40 до 1,35 м – суглинком с прослоями торфа и льда, ниже 1,35 м – песком. Среднегодовая температура грунтов на подошве слоя годовых теплооборотов в 2007 г. по сравнению с 2004 г. под влиянием одной многоснежной и двух аномально многоснежных зим повысилась на 3,6 °С (рис. 1). В последующие три малоснежные зимы (2008–2010 гг.) и два сухих летних сезона мощность сезоннопротаивающего слоя сократилась до уровня 1980-х годов, температура грунтов на глубине 10 м понизилась на 2,6 °С (рис. 2).

Влияние пирогенеза на температурный режим грунтов изучено довольно детально в песчано-грядовом и межлассном типах местности. Воздействие лесного пожара на динамику термического состояния грунтов можно оценить по данным наблюдений в песчано-грядовом типе местности в сосновом лесу (С-13). Пожар в июне 1987 г. уничтожил маломощный травяно-толокнянковый напочвенный покров и в последующем стал причиной вывала молодого соснового древостоя. В первый год наблюдений температура песчаных грунтов на глубине нулевых амплитуд составила –2,1 °С. В течение первых 4 лет после пожара отмечается резкое повышение температуры (примерно на 1,5 °С). Начиная с 5-го года на пирогенном участке при слабом самовосстановлении березово-кустарниковой растительности наблюдается стабилизация температуры грунтов и ее значения не выходят за пределы –0,3...–0,4 °С (рис. 3). В залесенных дренированных грядах песчано-грядового типа местности при уничтожении пожаром маломощного лишайниково-толокнянкового покрова в сосняках отмечается незначительное повышение температуры сезоннопротаивающего слоя (0,1–0,3 °С). Лесные пожары в лиственничниках в межгрядово-низинном типе местности повышают t_0 на 0,3–0,8 °С.

В 2003 г. на междуречье рек Кенкеме и Лена в межлассном типе местности организованы исследования динамики теплового состояния грунтов на 2 экспериментальных площадках: в лесу и на гари со сплошной вырубкой сгоревшего леса. Здесь многолетнемерзлые породы представлены льдистыми пылеватыми и мелкозернистыми песками. На естественной площадке на фоне чередования холодных, теплых и близких к норме среднегодовых температур воздуха сочетания аномально сухих и аномально влажных летних се-

зонов до 2008 г. наблюдается увеличение глубины сезонного протаивания и отмечено формирование надмерзлотных вод СТС под влиянием заболачивания окружающего нарушенного (горелого) участка, где мощность сезонно талого слоя увеличилась по сравнению с 2003 годом на 0,9 м. В лесу в 2009 г. температура мерзлых грунтов в слое годовых колебаний повысилась на 2,5 °С. Результаты эксперимента показывают, что на гари глубина максимального протаивания грунтов увеличилась по сравнению с естественным условием (лес) почти в 3 раза. На гари с вырубкой в зависимости от метеоусловий холодного периода формируется сезонномерзлый слой, т.е. зона талика (рис. 4). Температура грунтов на подошве годовых теплооборотов на гари в 2009 г. повысилась по сравнению с 2003 г. на 2,7 °С и в последующие годы на 2–3 стадиях сукцессионного восстановления растительного покрова стабильно держится на уровне –1,4...–1,9 °С (рис. 5).

По материалам определения физических свойств грунтов, полученных при бурении скважин на экспериментальных площадках несложно посчитать объем воды при протаивании льдистого мерзлого грунта. На 1 кубический метр льдистого грунта (при суммарной влажности 0,21 д.е. и объемного веса в сухом состоянии 1640 кг/м³) объем воды составляет 0,34 м³. На участках развития пород ледового комплекса эти значения увеличиваются в разы. Например, при льдистости грунтов 0,7–0,8 д.е. свободная вода составляет 0,64–0,74 м³ на 1 кубический метр. Используя эти показатели и данные экспериментальных наблюдений, было вычислено содержание количества воды при оттаивании многолетнемерзлых пород. На лесной пирогенной территории площадью около 50412 км² (табл. 1) объем воды в оттаивающих слоях мерзлых пород с текстурообразующими льдами ($\Delta\xi$) мощностью 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 м может составить соответственно 8,6; 17,1; 25,7 и 34,3 км³, а с подземными льдами – 18,6; 37,3; 55,9 и 74,6 км³ (табл. 2). Некоторая часть этих вод в последующем дренируется по естественным водотокам или накапливается в отрицательных формах рельефа, образуя водоемы и вызывая развитие негативных криогенных процессов. В основном этим и объясняется повышенная обводненность и заболачивание территории Центральной Якутии за последние годы.

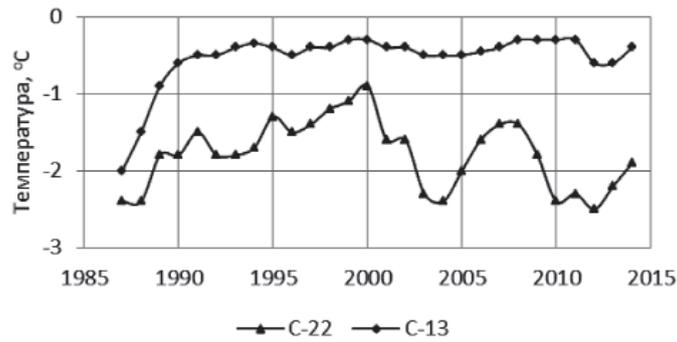


Рис. 3. Динамика среднегодовой температуры грунтов на глубине 10 м в сосняке (С-22) и на гари с вырубкой (С-13) в песчано-грядовом типе местности

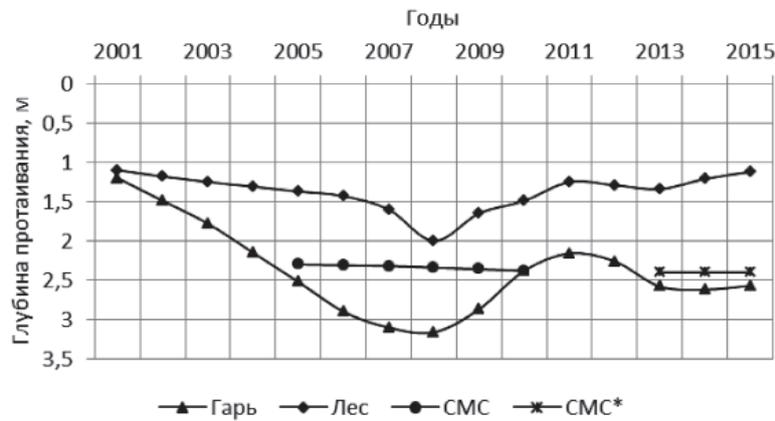


Рис. 4. Динамика глубины протаивания грунтов в лесу и на гари с вырубкой в межлассном типе местности (СМС – сезонномерзлый слой, СМС* – предполагаемый сезонномерзлый слой)

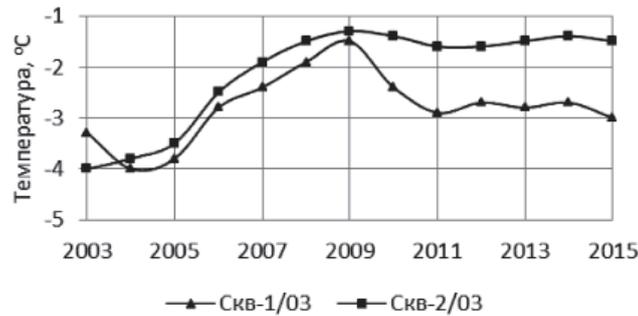


Рис. 5. Динамика среднегодовой температуры грунтов на глубине 10 м в березово-лиственничном лесу (Скв-1/03) и на гари с вырубкой (Скв-2/03) в межлассном типе местности

Таблица 2

Прогнозная оценка объёма воды в оттаивающем слое ($\Delta\xi$) многолетнемерзлых пород на гарях Центральной Якутии

Вид нарушений	$\Delta\xi$, м	Объём воды, м ³			
		При льдистости грунтов 0,21 д.е.		При льдистости грунтов 0,80 д.е.	
		1 км ²	50 412 км ²	1 км ²	50 412 км ²
Гари	0,5	170·10 ³	8,57·10 ⁹	370·10 ³	18,652·10 ⁹
	1,0	340·10 ³	17,14·10 ⁹	740·10 ³	37,304·10 ⁹
	1,5	510·10 ³	25,71·10 ⁹	1 110·10 ³	55,957·10 ⁹
	2,0	680·10 ³	34,28·10 ⁹	1 480·10 ³	74,610·10 ⁹

Выводы

1. В естественных условиях сочетание аномального повышения среднегодовых температур воздуха и аномально-го увеличения осадков сопровождается оттаиванием верхних горизонтов многолетнемерзлых пород. Этот фактор способствует развитию термокарста и термоэрозии, заболачиванию и обводнению территорий, повышению уровней зеркала воды озер и надмерзлотных вод сезонноталого слоя, затоплению ранее сухих озерных котловин.

2. На пирогенных лесных территориях установлено значительное оттаивание пород «ледового комплекса». Главной причиной повышенной обводненности территории Центральной Якутии за последние годы является деградация мерзлоты под влиянием периодически повторяющихся лесных пожаров на фоне увлажненных летних сезонов и многоснежных зим.

3. Количественно оценена постпирогенная динамика среднегодовой температуры грунтов в зависимости от стадий самовосстановления растительности.

Список литературы

1. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н., Шендер Н.И. Тепловое состояние верхних горизонтов криолитозоны Центральной Якутии // Десятая Международная конференция по мерзлотоведению ТАСОР: Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире (Труды X Международной конференции по мерзлотоведению. Салехард, 25–29 июня 2012 г.). – Тюмень, 2012. – Т. 3. – С. 47–52.
2. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия). – Якутск – Ижевск, 1998–2014.
3. Методы региональных инженерно-геокриологических исследований для равнинных территорий. – М.: Недра, 1986. – 207 с.
4. Скачков Ю.Б. Реакция криолитозоны Центральной Якутии на современное изменение климата // Материалы Международной научной конф. (Иркутск, 17–21 сент. 2012 г.). – Иркутск, Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2012. – Т. 1. – С. 236–238.
5. Stepan Varlamov, Yuri Skachkov, Pavel Skryabin. 2014. Current climate change effects on the ground thermal regime in Central Yakutia // Sciences in Cold and Arid Regions. – 2014. – Vol. 6, № 4. – P. 282–292.