

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт фундаментальной биологии и биотехнологии
Базовая кафедра биотехнологии

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ Т.Г. Волова

подпись

«_____» _____ 20 ____ г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

06.03.01 Биология

Гетеротрофная активность мерзлотных почв Центральной Якутии

Руководитель _____ к. б. н., доцент С.Ю. Евграфова

Выпускник _____ А.В. Шалагина

Красноярск 2022

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Гетеротрофная активность мерзлотных почв Центральной Якутии» содержит 36 страниц текстового документа, 4 иллюстраций, 6 таблиц, 46 использованных источников, 10 листов графического материала.

ВЕЧНАЯ МЕРЗЛОТА, ГЕТЕРОТРОФНАЯ АКТИВНОСТЬ, ПОЧВЕННОЕ ДЫХАНИЕ, УГЛЕКИСЛЫЙ ГАЗ, ЕДОМА, УГЛЕРОД

Объект исследования – почвы едомных обнажений Центральной Якутии местности Нелегер и Кыччыма.

Цель работы – исследование активности гетеротрофных микроорганизмов мерзлотных почв Центральной Якутии.

Задачи исследований:

1. Определить базальное дыхание гетеротрофных микроорганизмов мерзлотных почв едомных обнажений Центральной Якутии;
2. Определить потенциальную гетеротрофную микробную активность почв едомных обнажений Центральной Якутии.
3. Соотнести полученные данные с содержанием в почве органического и неорганического углерода.

Актуальность данной работы состоит в том, что в соответствии с недавними исследованиями, регионы вечной мерзлоты будут затронуты повышением глобальных температур, и последующее таяние вечной мерзлоты, вероятно, не только приведет к повышенной активности автохтонной микробиоты вечной мерзлоты, но также высвободит значительное количество углерода, что, в свою очередь, приведет к эмиссии парниковых газов (CO_2 , CH_4).

В результате работы было определено потенциальное и базальное дыхание почв двух едомных обнажений Центральной Якутии и полученные данные соотнесены с содержанием в почве органического и неорганического углерода.

СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ	2
ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. Обзор литературы.....	6
1.1 Общая характеристика криолитозоны России	6
1.2 Характеристика района Центральной Якутии	8
1.3 Особенности рельефа Центральной Якутии	9
1.4 Тенденция к потеплению.....	11
1.5 Залежи углерода	12
1.6 Психрофилы.....	14
1.7 Дыхание в мерзлых грунтах.....	15
Глава 2. Объект и методы исследования	17
2.1 Описание объекта исследования	17
2.1.1 Нелегер	17
2.1.2 Кыччыма.....	19
2.2 Лабораторные инкубационные эксперименты	21
Глава 3. Результаты исследования	25
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	32
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	33

ВВЕДЕНИЕ

По оценкам, 25% площади суши на Земле покрыто вечной мерзлотой. Классическое определение вечной мерзлоты - это почва, которая оставалась замороженной (то есть ниже 0°C) в течение как минимум 2 лет подряд. Однако часть древней вечной мерзлоты оставалась замороженной в течение нескольких периодов оледенения. На самом деле вечной мерзлоте может быть до 1-3 миллионов лет в Арктике и даже больше в Антарктиде.[1]

В зависимости от местоположения и климатических условий в то время поверхность земли, которая в настоящее время является вечной мерзлотой, изначально не была заморожена и могла быть покрыта либо растительностью, либо водой. Часть растительного и животного материала и микробной биомассы, которые накапливались в атмосфере, богатой CO₂, и в теплые периоды в истории Земли, сохранились в вечной мерзлоте во время похолодания и оледенения. Хотя растения и животные, попавшие в ловушку во время этого перехода, погибли, современные данные говорят о том, что многие микроорганизмы смогли адаптироваться и даже оставаться активными.

Недавние исследования показывают, что регионы вечной мерзлоты будут затронуты повышением глобальных температур, и последующее таяние вечной мерзлоты, вероятно, не только приведет к повышенной активации местных микроорганизмов вечной мерзлоты, но также высвободит значительное количество углерода и питательных веществ, которые могут оказаться использованы для их ускоренного роста. Все это может привести к интенсификации эмиссии парниковых газов в атмосферу (CO₂, CH₄) и, тем самым, увеличить влияние на глобальное потепление климата посредством обратных положительных связей.

Целью данной работы являлось изучение активности гетеротрофных микроорганизмов мерзлотных почв Центральной Якутии.

В задачи исследования входило:

1. Определить базальное дыхание гетеротрофных микроорганизмов мерзлотных почв едомных обнажений Центральной Якутии;
2. Определить потенциальную гетеротрофную микробную активность почв едомных обнажений Центральной Якутии.
3. Соотнести полученные данные с содержанием в почве органического и неорганического углерода.

Глава 1. Обзор литературы

1.1 Общая характеристика криолитозоны России

Криолитозона - это верхний слой земной коры, характеризующийся отрицательной температурой горных пород и почв и наличием или возможностью существования подземного льда. Широко используется термин “вечная мерзлота” (ММП), часто называемый многолетней или вечной мерзлотой, которая представляет собой любое вещество, расположенное ниже поверхности земли, температура которого остается отрицательной в течение двух или более лет подряд, и в котором по крайней мере часть воды перешла в кристаллическое состояние (лед). [2]

Криолитозона охватывает 24% площади суши Северного полушария (около 22,8 млн км²), в том числе более 11 млн км² в России, занимая около 65% территории страны.

Основными характеристиками криолитозоны являются сомкнутость ММП, т. е. доля площади, которую они занимают в данной области, среднегодовая температура пород, характер распространения ММП по разрезу (сливающиеся и нессливающиеся толщи), глубина верхней и нижней границ мерзлых пород (также называемых кровлей и подошвой), разница которых определяет вертикальную мощность ММП, а также мощность сезонно-талого слоя (СТС). В зависимости от сомкнутости многолетнемерзлых пород различают области сплошного (ММП занимают более 90% площади), прерывистого (50—90%), островного (10—50%) и редкоостровного (менее 10%) распространения, между которыми можно провести условные границы.

Сплошная вечная мерзлота широко распространена в северной части Большеземельской тундры, на Полярном Урале, в тундре Западной Сибири, в северной части Центрально-Сибирского плоскогорья, на полуострове Таймыр, архипелаге Северная Земля, на Новосибирских островах, Яно-

Индигирской низменности, Колымской низменности, в дельте реки Лена, на Центрально-Якутской низменности, Приленском плато и в районах Верхоянского хребта и хребта Черского, Колымского нагорья, Анадырского плато, Юкагирского плато и Анадырской низменности. Толщина вечномёрзлых пород колеблется от 300 до 500 м и более, в горах – до 1500 м; температура – от -3 до -9°C и ниже.[3]

Вечная мерзлота с островками талых грунтов (прерывистая, спорадическая) преобладает в Большеземельской и Малоземельской тундрах, на Средне-Сибирском плоскогорье между реками Нижняя Тунгуска и Подкаменная Тунгуска, в южной части Приленского плато, в Забайкалье. Толщина мерзлых пластов иногда достигает 250-300 м, но чаще колеблется от 10-20 до 100-150 м, температура от 1 до -3°C.

Островная вечная мерзлота развита на Кольском полуострове, в Канино-Печорском регионе, в таежной зоне Западной Сибири, в южной части Центрально-Сибирского плоскогорья, на Дальнем Востоке, вдоль побережья Охотского моря и на севере полуострова Камчатка. Толщина колеблется от нескольких метров до нескольких десятков метров, температура – от 0 до -2°C. Островная вечная мерзлота характерна также для горной страны Саян, природных территорий Урала и Кавказа, где она встречается в основном на периферии районов современного оледенения.



Рисунок 1 - Распространение многомерзлых пород.

Криолитозона России содержит в себе более 30% разведанных и более 90% потенциальных запасов углеводородов, значительную часть месторождений золота, олова, никеля, меди, угля, торфа, леса, а также гидроресурсов и пресной воды.

1.2 Характеристика района Центральной Якутии

Территория Центральной Якутия расположена между восточным пологим склоном Средне-Сибирского плоскогорья, юго-западным уступом верхоянских хребтов и северной окраиной Алданского нагорья.

К району Центральной Якутии относится территория, включающая правобережье и левобережье р. Лены, приуроченные к Центрально-якутской низменности. В административном отношении эта территория находится в подчинении органов управления г. Якутска.

Характер климата Центральной Якутии резко континентальный, проявляющейся в относительно малом количестве выпадающих атмосферных осадков и больших годовых колебаниях температуры.

На территории развита растительность, характерная для таежной зоны - лиственные с примесью ели и сосны бруснично-зеленомошные леса. Среди лиственного и соснового леса встречается редкая береза. В подлеске распространены ива, таволга, шиповник. Травяной и кустарниковый покров состоит из багульника, голубики, брусники, осоки и др. На островах и в пониженных частях поймы растет тальник, в ложбинах по иловатым отложениям поселяется полевой хвощ, с удалением от берега формируются разнотравно-злаковые луга. Кроме луговой растительности, на пойменной и частично надпойменных террасах распространены разнообразные кустарники и древесные породы: боярышник даурский, шиповник иглистый, ольховник кустарниковый и др. К юго-западу от Якутска окружающая

местность занята древесными лесонасаждениями: березовыми рощами, сосновыми и лиственничными борами, перемежающимися с полянами суходольных лугов. К северу и югу от города расположены поля и суходольные луговые участки (в основном занимаемые сельскохозяйственными угодьями).

Также стоит сказать, что растительный покров района сильно изменен в результате продолжительной хозяйственной деятельности человека, лесных пожаров и др. На месте коренных хвойных лесов появляются временные леса - сосняки, кустарники, березняки и осинники.

1.3 Особенности рельефа Центральной Якутии

Центральные и западные низменности Республики Саха являются критическими регионами вечной мерзлоты во всем мире из-за глубины слоя вечной мерзлоты, простирающегося более чем на 1000 м в некоторых местах, и сопоставимо высокого уровня содержания льда на больших площадях [4].

Поверхность почвы в течение длительного периода подвергалась воздействию очень низких температур воздуха, что привело к промерзанию грунта и образованию вечной мерзлоты на глубине нескольких сотен метров [5]. Для Лено-Алданского района, одна из объяснительных теорий предполагает, что в позднем плейстоцене река Лена образовала большое озеро, запруженное верховьянскими горными ледниками, и возникли обширные прилегающие водно-болотные угодья [6]. Образовавшиеся в результате этого влажные почвы подверглись растрескиванию от мороза, образованию полигонального рельефа и активному образованию ледяных клиньев. Неоднократные изменения климатических условий, уровня воды, эрозии и осадения привели к образованию террас [7]. Ежегодные циклы таяния и замерзания вместе с сингенным накоплением полигенных отложений привели к постепенному образованию значительных ледяных клиньев.

Эти ледяные комплексы или отложения Едома покрывают значительную часть центральной и западной Якутии и характеризуются более чем 60%-ным содержанием грунтового льда [8;7], в которых один только объем ледяного клина оценивается примерно в 50% от общего объема вечной мерзлоты [9].

Колебания климатических условий в раннем и среднем голоцене привели к обширному образованию термокарста, вызванному деградацией (т.е. оттаиванием) богатых льдом отложений вечной мерзлоты и последующее оседание поверхности [10; 11; 12; 13].

Процесс термокарста инициируется постепенным углублением слоя сезонного оттаивания (т.е. активного слоя) из-за потепления почвы и последующего таяния подстилающего ледяного комплекса, инициированного более теплыми климатическими периодами. Этот процесс также может начаться из-за ограниченных во времени и пространстве неклиматических факторов, таких как разрушение растительного покрова, местная эрозия, лесные пожары и изменения в землепользовании. Этот процесс происходит в течение десятилетий, столетий или нескольких тысяч лет и состоит из четырех основных стадий, каждая из которых приводит к возникновению различных термокарстовых форм рельефа (в Саха быллар, тымпы) и, наконец, термокарстовой впадины под названием алас [14; 10]. Сроки сильно варьируются, причем первые две стадии инициации и расширения происходят в течение нескольких десятилетий или до нескольких сотен лет [14; 15]. Сегодня мы можем наблюдать все этапы эволюции термокарста в центральной и западной низменностях Республики Саха. Однако динамика термокарста до сих пор до конца не изучена.[16]

Типичная форма аласов - это впадина с крутым склоном, плоским дном с лугами и прудом в центре. На лугах внутри аласа преобладают несколько видов трав. Как правило, вокруг пруда образуется несколько поясов,

состоящих из различных видов растительности, а также градиент влажности почвы и солености.[17]

Размеры аласов варьируются от десятков метров до нескольких километров в диаметре и от нескольких до десятков метров в глубину впадины. В низменности центральной Якутии распространено около 16 000 аласов общей площадью 4,4 10⁵ га, что составляет 17% от общей площади суши [18]. Алас является завершающим этапом сукцессии термокарстовой впадины в центральной Якутии. Образование термокарста инициируется тепловыми возмущениями на богатой льдом вечной мерзлоте из-за серьезных лесных нарушений, таких как естественный лесной пожар или деятельность человека. После нарушения происходит таяние вечной мерзлоты, таяние ледяного клина и последующее оседание суши.

1.4 Тенденция к потеплению

Температура воздуха в высокоширотных районах Земли за последние 30 лет повысилась на 0,06°C год⁻¹, что примерно в два раза превышает рост глобальных температур за тот же период (МГЭИК, 2013). Поскольку эти районы залегают под вечной мерзлотой в различной степени (от единичных до сплошных) и на разной глубине (от метров до максимума около 1500 м) [19], они восприимчивы к оттаиванию и, следовательно, потенциально восприимчивы к серьезным изменениям поверхностных и подповерхностных условий, которые, вероятно, приведут к мобилизации накопленного углерода [20].

В окрестностях Якутска наблюдалось длительное таяние вечной мерзлоты, происходящее в сочетании с тенденцией потепления атмосферы [21]. Многолетнемерзлое таяние в регионе приводит к различным изменениям в структуре ландшафта, таким как усиление регрессивной активности таяния [22], эрозия берегов рек [23] и образование термокарста.

Природные и антропогенные нарушения, такие как пожары и вырубка лесов, были определены как возможные причины таяния вечной мерзлоты в этих районах.

Температура поверхности суши в центральной части водосборного бассейна реки Лены является одной из наиболее быстро меняющихся в северном полушарии. Изменения температуры поверхности суши в этом районе, как правило, положительные ($0,12 \text{ }^\circ\text{C год}^{-1}$), при этом в некоторых частях района наблюдается потепление до $0,49 \text{ }^\circ\text{C год}^{-1}$ в сентябре-октябре и $0,37 \text{ }^\circ\text{C год}^{-1}$ в апреле–мае. Это примерно в десять раз превышает скорость глобального потепления в $0,0116 \text{ }^\circ\text{C/год}$ (с 2000 по 2014 год) [24], что является дополнительным доказательством быстрого потепления в Арктике.

В нескольких недавних публикациях сообщалось об общем сокращении снежного покрова в Арктике [25; 26; 27].

Также были обнаружены заметные изменения на поверхности вечной мерзлоты в центральной Якутии в период с 2000 по 2011 год, включая интенсивное потепление поверхности, уменьшение площади снежного покрова весной, увеличение и уменьшение площади, покрытой озерами, и изменения в растительности из-за крупных лесных пожаров.[28]

1.5 Залежи углерода

Залежи вечной мерзлоты представляют собой один из крупнейших резервуаров углерода на земле. Многолетнее замораживание в значительной степени предотвращает разложение и сохраняет органический материал. Эти промерзлые почвенные условия встречаются в почве примерно на четверти поверхности суши Северного полушария [29]. Расчетное количество замороженного и размороженного углерода, хранящегося в земной зоне вечной мерзлоты, составляет от 1330 до 1580 Гт [30; 20], что примерно на 45% больше, чем в настоящее время присутствует в атмосфере (≈ 864 Гт, исходя из 407 ppm CO_2 , измеренных в 2018 году; [31]. Агрегация и

сохранение вечной мерзлоты сильно зависят от долгосрочных климатических условий, как непосредственно через температуру воздуха, так и косвенно через наличие или отсутствие изолирующей растительности и снежного покрова [32]. В настоящее время эти условия вечной мерзлоты находятся под угрозой быстрого повышения глобальных и, в частности, арктических температур воздуха, что привело к повсеместному потеплению вечной мерзлоты в последние годы [33].

Особым типом вечной мерзлоты является месторождение ледяного комплекса Едома, которое образуется сингенетически позднеплейстоценовым отложением мелкозернистых отложений с большими объемами грунтового льда. Едома богата льдом (50-90 об.%, объемный процент, лед) и обычно имеет содержание органического углерода 2-4 мас. % (весовой процент) при расчетной толщине залежи до 40 м [34; 35].

В контексте глобального изменения климата такое высокое содержание льда с внутридиментальным льдом и сингенетическими ледяными клиньями делает отложения Едомы очень уязвимыми к вызванным оттепелью изменениям ландшафта [34].

Во время термокарстовых процессов органический материал, хранящийся в вечной мерзлоте, подвергается разложению в талых луковицах (таликах) под термокарстовыми озерами. Он также выделяется в атмосферу в результате микробной активности в незамерзших и водных условиях в виде газов, таких как углекислый газ или метан, усиливая глобальное изменение климата [35]. После осушения озера в результате образующиеся термокарстовые отложения в бассейнах алас вновь замерзают, а оставшийся в плейстоцене почвенный углерод, а также углерод из новой растительной биомассы, образующейся в термокарстовых озерах и бассейнах, снова становится защищенным от разложения. Возникновение этих процессов дренирования и повторного замораживания обычно определяется более

высоким содержанием углерода по сравнению с соседними отложениями [36]. Полученные ландшафтные узоры Едомской возвышенности и бассейны алас образуют гетерогенную ландшафтную мозаику [37]. Неоднородность и характер углерода в пределах этих типов отложений, особенно ниже 3 м, до сих пор слабо изучены.

1.6 Психрофилы

Большая часть биосферы Земли характеризуется низкими температурами ($<5^{\circ}\text{C}$), и следовательно широко распространены микроорганизмы, адаптированные к холоду. Эти психрофилы развили сложный спектр адаптаций всех клеточных составляющих, чтобы противодействовать потенциально вредным воздействиям среды с низкой кинетической энергией и замерзанием воды. Микробная жизнь продолжается и в диапазоне отрицательных температур, и эта активность способствует притоку углерода и азота в экосистемы и из них, что в конечном итоге влияет на глобальные процессы. [38]

Микробы, безусловно, выделяют в атмосферу лишь небольшое количество углерода по отдельности, но глобальное изобилие микробов, которые минерализуют соединения углерода и азота в парниковые газы, дает им возможность геоинженерировать климат. Мы только начинаем понимать роль микробов в потоке углерода и азота в водных, ледяных и почвенных экосистемах, и, несмотря на достигнутый прогресс, усилия должны быть сосредоточены на экосистемах, наиболее уязвимых к изменению климата.

Прогнозируется, что изменение климата в наибольшей степени повлияет на микробные сообщества, которые включают бактерии, археи и эукариоты (в частности, грибы), в мерзлых почвах. Потепление способно привести к изменениям в метаболической деятельности микроорганизмов и потенциально создать петлю положительной обратной связи, способствующую ускорению условий оттаивания [39]. Для точного

моделирования выбросов парниковых газов в результате микробной активности в мерзлых почвах необходим многомерный подход, который связывает динамику микробного сообщества с минерализацией углерода и азота от экологически репрезентативных минусовых температур до более высоких температур. Возможно, тогда мы сможем начать понимать, как небольшие “утечки” парниковых газов в результате микробной деятельности могут привести к переломному моменту для замороженных экосистем Земли.

1.7 Дыхание в мерзлых грунтах

Возможно, наиболее распространенным способом измерения аэробной и анаэробной биологической активности в мерзлых почвах является мониторинг выделения газов, таких как CO_2 при аэробном дыхании и NO_2 - при анаэробном дыхании на нитратах (денитрификация). Образование и высвобождение CH_4 в результате анаэробного метаногенного разложения также измерялись в мерзлых почвах. Измерения дыхания позволяют количественно оценить биологическую активность и выбросы парниковых газов из различных типов мерзлых почв, начиная от вечной мерзлоты и заканчивая холодными пустынями. Например, в мерзлых почвах с пастбищ и пахотных земель в Исландии аэробное дыхание гетеротрофных микробов было измерено до -10°C и до -18°C в тундровых почвах Гренландии [40, 41]. Дыхание увеличилось на порядки, когда температура почвы повысилась всего с -1 до 0°C , что было измерено постоянным мониторингом CO_2 в почвах хвойных лесов в Скалистых горах Колорадо [42], что подчеркивает важность даже незначительного изменения физической среды мерзлых почв.

На уровень экосистемного дыхания в почвах может влиять множество факторов, включая содержание органического вещества в почве, растительный покров, доступность воды, накопление снега или снежного покрова, температура и микробная биомасса. Также было показано, что почвенное дыхание имеет линейную зависимость от численности гетеротрофных бактерий, по крайней мере, в почвах аляскинской тундры

[43]. Таким образом, любые изменения в росте и размножении гетеротрофных бактерий, вероятно, окажут значительное влияние на чистый отток дыхания из арктических почв. В частности, в мерзлых почвах температура и доступность воды являются важными факторами, влияющими на активность гетеротрофных бактерий [44].

Глава 2. Объект и методы исследования

2.1 Описание объекта исследования

Объектом исследований служили мерзлотные почвы, отобранные в местности Нелегер и местности Кыччыма.

2.1.1 Нелегер

Местность Нелегер расположена в 35 км к северо-западу от Якутска в Лено-Амгинской провинции Центральной Якутии. Было исследовано 30 образцов почвы, отобранных по 10 см, общей глубиной 3 м.

Этот участок характеризуется бореальным типом средней тайги с преобладанием лиственничных лесов. Лиственничник брусничный – зональный тип в Центральной Якутии. Сосновые леса встречаются местами. Березовые леса представлены на гарях и околках. Малонарушенные леса представлены лиственницей и брусникой. Основные площади занимают березовые и лиственнично-березовые травяные леса. Лиственный лес составляли деревья *Larix gmelinii* старше 130 лет со средней высотой 17–18 м и сомкнутостью крон равную – 0.6. Высокороослый кустарниковый ярус состоит из кустарниковой ивы (*Salix fruticosa*), березы (*Betula fruticosa*) и живой изгороди шиповника (*Rosa acicularis*). Травянистый и невысокий кустарниковый ярус характеризуется травами (*Limnas stelleri Trin.*) и брусникой (*Vaccinium vitis-idaea*) с охватом от 50 до 70%. Покров мхов и лишайников был редким, занимал менее 10% площади.

В геоморфологическом отношении исследуемая территория относится к денудационной равнине. Аласы представляют собой неглубокие термокарстовые впадины от 2 до 3 м глубиной и обычно содержат бугры пучения. Вечная мерзлота на площади Нелегера простирается до глубины 400–450 м. Температура грунта колеблется в диапазоне от -2 до -3 °С с нулевой годовой амплитудой на глубине. Объемная льдистость (без учета

клина) осадков ледяного комплекса составляет от 30 до 70% и в среднем 50–55%. [45]

Таблица 1. Глубина отбора образцов местности Нелегер

№ образцов	Глубина отбора, см	Слой
1	0-10	Деятельный слой (активный, сезонноталый)
2	10-20	
3	20-30	
4	30-40	
5	40-50	
6	50-60	
7	60-70	
8	70-80	
9	80-90	
10	90-100	
11	100-110	
12	110-120	
13	120-130	Защитный или переходный слой
14	130-140	
15	140-150	
16	150-160	
17	160-170	
18	170-180	
19	180-190	Многолетнемерзлые породы
20	190-200	
21	200-210	
22	210-220	
23	220-230	
24	230-240	
25	240-250	
26	250-260	
27	260-270	
28	270-280	
29	280-290	
30	290-300	

Таблица 2. Характеристика почвы обнажения едомы в местности Нелегер

Местность	Глубина / Горизонт, см	Диагностика
Координаты: N62°18.943' E129°29.962' Намский район, Нелегер Почва: Мерзлотно- таежная осолоделая	АО 0-3	Лесная подстилка из хвои, веток и ветоши
	A ₁ 3-8	Грубогумусовый горизонт, обилие тонких корешков, переход ясный, граница ровная, от темно-коричневого до черного
	A ₂ 8-10	Собственно гумус, наличие крупных ветвей, переход резкий, граница неровная
	B 10-21	В средней степени пронизан тонкими корнями, подзолистый, белесый, граница неровная
	C 21-57	Иллювиальный, пронизан корнями, заплывы растворенного гумуса, светло-коричневый

2.1.2 Кыччыма

Местность Кыччыма находится в 92 км к северо-востоку от Якутска в Лено-Амгинской провинции Центральной Якутии. Бореальные леса в основном состоят из *Larix cajanderi* с несколькими сообществами *Pinus sylvestris*. Дрестовой из лиственницы без примеси других видов, остались лишь очень мелкими пятнами. Большая часть площади заняты вторичными лесами и безлесными поверхностями, возникшими в результате заготовка древесины различной интенсивности. Смешанные березово-лиственничные леса с преобладанием лиственницы встречаются на местах рубок древесины. [46].

В геоморфологическом отношении исследуемая территория относится к эрозионно-аккумулятивной Абалахской равнине долины р. Лены и представляет собой пологую плоскую поверхность, сложенную термокарстовыми впадинами. Мощность ледового комплекса составляет от 15 до 150 м, а его объемная льдистость 50–60%. Температура грунта составляет -3 °С. Для участка характерны термокарстовые котловины (аласы) с активными термокарстовыми процессами и молодые термокарстовые озера.

66,4% площади территории покрыто едомными отложениями. Озера покрывают около 13,0% ландшафта и примерно 20,6% площади составляют осушенные озера, отсюда аласные комплексы покрытые лугами. [47]

Таблица 3. Глубина отбора образцов местности Кыччыма

№ образцов	Глубина отбора, см	Слой
1	0-10	Деятельный слой (активный, сезонноталый)
2	10-20	
3	20-30	
4	30-40	
5	40-50	
6	50-60	
7	60-70	
8	70-80	
9	80-90	
10	90-100	
11	100-110	
12	110-120	
13	120-130	
14	130-140	
15	140-150	
16	150-160	
17	160-170	Многолетнемерзлые породы
18	170-180	
19	180-190	
20	190-200	
21	200-210	
22	210-220	
23	220-230	
24	230-240	
25	240-250	
26	250-260	
27	260-270	
28	270-280	
29	280-290	
30	290-300	
31	300-320	
32	320-340	
33	340-360	
34	360-380	
35	380-400	

Таблица 4. Характеристика почвы обнажения едомы в местности
Кыччыма

Местность	Глубина / Горизонт, см	Диагностика
Координаты: N62°35'11,57" E131°02'26,75" Усть-Алданский р-н, с. Сырдах, местность Кыччыма Почва: Палевая супесчаная	A ₀ 0-1	Лесная подстилка
	A ₁ 1-4	Растительные остатки из хвои, ветоши и трав, грубогумусовый, переход ясный, граница ровная
	AB 4-6	Гумус, языки (заплывы) гумуса по трещинам до глубины 18 см, коричневый, переход резкий, граница неровная
	B 6-37	Много включений древесного угля и живых корней, супесчаный, сложение рыхлое, палево-серый, трещиноватый, переход слабозаметный
	C 37-280	По трещинам затёки (разводы) растворенного древесного угля на глубинах 60, 70 и 115 см, супесчаный, сложение рыхлое, палево-темно-серый
	280	Верхняя кровля повторно-жильного льда

2.2 Лабораторные инкубационные эксперименты

С образцами мерзлотной почвы были проведены инкубационные эксперименты по определению базального и потенциального дыхания.

В инкубационные сосуды объемом 150 мл помещался образец почвы (10 г), а затем сосуд закрывался герметичной закручивающейся крышкой с силиконовой прокладкой. Каждый образец вносился в трех повторностях. Схема инкубационной камеры показана на рисунке 2.

После внесения образцов производился анализ количества выделяемого микроорганизмами углекислого газа при помощи газового анализатора Picarro 2201-i (Picarro Inc., USA). Затем образцы были отправлены на инкубацию, и повторные измерения производились спустя двое суток.

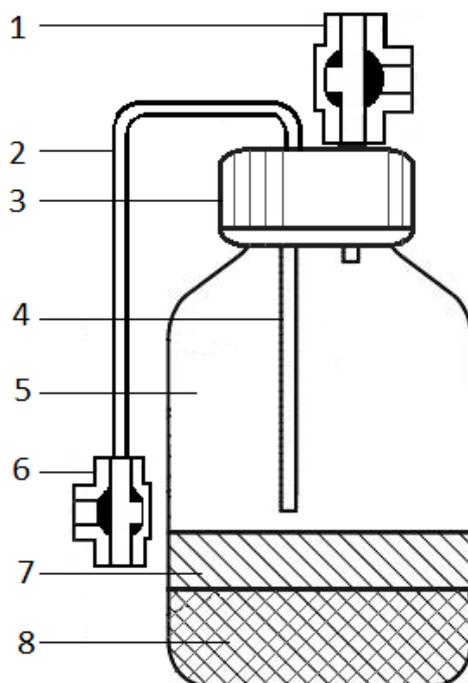


Рисунок 2 - Схема инкубационной камеры.

1- кран для подачи газа; 2 – трубка для отбора образовавшихся газов; 3 – герметичная крышка; 4 – внутренняя трубка для отбора газа; 5 – инкубационный сосуд; 6 – кран для отбора газа;

Пересчет количества выделенного CO_2 на грамм почвы производился по формуле:

$$mg CO_2 = ppmCO_2 \cdot (Vair \cdot MCO_2) / 22,41 \cdot 273,15 / Tair \cdot 1/g, \quad (1)$$

где $ppm CO_2$ – кол-во выделенного CO_2 ,

$Vair$ – объем сосуда,

MCO_2 – молярная масса CO_2 , г/моль ;

$Tair$ – температура воздуха, К ;

g – вес образца, г .

Стоит добавить, что также производился пересчет веса образцов на сухой вес по формуле:

$$\text{Сух. вес} = \frac{100 - W}{100}, \text{ где} \quad (2)$$

W – влажность образца, % .

Влажность в свою очередь рассчитывалась по формуле:

$$W = \frac{(\text{вес бюкса с обр.} - \text{вес пуст.бюкса}) \cdot 100}{\text{вес сух. пробы} - \text{вес пуст.бюкса}} \quad (3)$$

Базальное дыхание (БД) рассчитывалось по формуле:

$$\text{БД} = \frac{mg \text{ CO}_{20} - mg \text{ CO}_{21}}{t}, \text{ где} \quad (4)$$

БД – скорость выделения CO_2 , $mg \text{ CO}_2 \text{ ч}^{-1} \text{ г}^{-1}$;

t – время инкубации, ч;

$mg\text{CO}_{20}$ - $mg\text{CO}_2$ сразу после заложения образцов, г;

$mg\text{CO}_{21}$ - $mg\text{CO}_2$ после инкубации, г .

Для подсчета потенциального дыхания (ПД) производились следующие действия. В инкубационные сосуды с образцами вносилась в избытке глюкозо-минеральная смесь, затем инкубационные камеры продувались в течении 1,5 минуты. Измерения выделенного CO_2 производились спустя полтора часа после продувания.

ПД рассчитывался по формуле:

$$\text{ПД} = \frac{mg \text{ CO}_{23}}{t}, \text{ где} \quad (5)$$

ПД – скорость выделения CO_2 , $\text{mg CO}_2 \text{ ч}^{-1} \text{ г}^{-1}$

$\text{mg CO}_2 \text{ }_3$ – mg CO_2 после внесения глюкозы, г

Глава 3. Результаты исследования

Изъятые страницы 25-31 в связи с авторским правом

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Базальное (БД) и потенциальное дыхание (СИД) почв двух исследуемых едом различалось: БД в почве едомы Нелегер варьировало от $0,011 \pm 0,009$ мгС-СО₂ г⁻¹ почвы ч⁻¹ до $0,330 \pm 0,019$ мгС-СО₂ г⁻¹ почвы ч⁻¹, в почве едомы Кычыыма от $0,25 \pm 0,04$ мгС-СО₂ г⁻¹ почвы ч⁻¹ до $2,38 \pm 0,32$ мгС-СО₂ г⁻¹ почвы ч⁻¹; СИД в едоме Нелегер варьировало от $0,23 \pm 0,23$ мгС-СО₂ г⁻¹ почвы ч⁻¹ до $33,52 \pm 1,12$ мгС-СО₂ г⁻¹ почвы ч⁻¹, в едоме Кычыыма от $0,22 \pm 0,20$ мгС-СО₂ г⁻¹ почвы ч⁻¹ до $4,99 \pm 0,29$ мгС-СО₂ г⁻¹ почвы ч⁻¹.

2. Высокие коэффициенты корреляции БД (0,80) и СИД (0,83) с содержанием почвенного органического углерода по профилю едомы Нелегер свидетельствовали о том, что большая составляющая микробного сообщества почв данной едомы относилась к гетеротрофному типу питания.

3. Высокие коэффициенты корреляции БД (0,78) и низкие СИД (0,28) с содержанием почвенного органического углерода по профилю едомы Кычыыма свидетельствовали о низком количественном представительстве гетеротрофов в почве данной едомы.

4. Высокая базальная активность микробиоты почв обеих едом, возможно, связана с особенностями типа почв (иллювиальные) и с миграцией органических веществ с почвенными растворами вглубь профиля мерзлоты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Jansson, J., Таş, N. The microbial ecology of permafrost. *Nat Rev Microbiol* 12, 414–425 (2014).
2. Гл. 8. Континентальная многолетняя мерзлота (с. 301) // МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ. Ред. С. М. Семёнов. М. Росгидромет, 2012 г. 508 стр.
3. Котляков В. М. МНОГОЛЕТНЯЯ МЕРЗЛОТА // Большая российская энциклопедия. Электронная версия (2019);
4. Czudek, T., Demek, J., 1973. Die Reliefentwicklung während der Dauerfrostbodendegradation [Relief evolution during permafrost degradation]. Akademia nakladatelství, Československé akademie věd, Prague (In German).
5. Hubberten, H.-W., Andreev, A., Astakhov, V.I., Demidov, I., Dowdeswell, J.A., Henriksen, M., Hjort, C., Houmark-Nielsen, M., et al., 2004. The periglacial climate and environment in northern Eurasia during the last glaciation. *Quat. Sci. Rev.* 23, 1333–1357.
6. Ivanov, I.V., Aleksandrovskii, A.L., Makeev, A.O., Bulgakov, D.S., Desyatkin, R.V., et al., 2015. Evoliutsiia pochv i pochvennogo pokrova: teoriia, raznoobrazie prirodnoi evoliutsii i antropogennykh transformatsii pochv [Soil and soil cover evolution: theory, diversification of natural evolution and anthropogenic transformation of soils]. GEOS, Moscow (In Russian).
7. Katasonov, E.M., Ivanov, M.S., Siegert, C., Katasonova, E.G., Pudov, G.G., 1979. Stroenie i absoliutnaia geokhronologiia alasnykh otlozhenii Tsentral'noi Yakutii [Structure and absolute geochronology of Central Yakutian alaa deposits]. Nauka, Novosibirsk (In Russian).

8. Solov'ev, P.A., 1959. Kriolitozona severnoi chasti Leno-Amginskogo mezhdurech'ia [Cryolithic zone of the northern part of Lena-Amga interfluve]. Izdatel'stvo Akademii SSSR, Moscow (In Russian).
9. Ivanov, M.S., 1984. Kriogennoe stroenie chetvertichnykh otlozhenii Leno-Aldanskoi vpadiny [The cryogenic structure of quaternary deposits of the Lena-Aldan depression]. Nauka, Novosibirsk (In Russian).
10. Bosikov, N.P., 1991. Evoliutsiia alasov tsentral'noi Iakutii [The alaa evolution in Central Yakutia]. Institut merzolotovedeniia im. Mel'nikova, Yakutsk (In Russian).
11. Katamura, F., Fukuda, M., Bosikov, N.P., Desyatkin, R.V., Nakamura, T., Moriizumi, J., 2006. Thermokarst formation and vegetation dynamics inferred from a palynological study in Central Yakutia Eastern Siberia, Russia. *Arctic. Antarct. Alp. Res.* 38, 561–570.
12. Kaplina, T.N., 2009. Alasnye komplekxy severnoy Yakutii [Alas complex of North Yakutia]. *Kriosfera Zemli (Earth Cryosphere)* 13 (4), 3–17 (in Russian).
13. Grosse, G., Jones, B., Arp, C., 2013. Treatise on Geomorphology. In: Shroder, J.F. (Ed.), Academic Press, San Diego, pp. 325–353.
14. Solov'ev, P.A., 1973. Thermokarst phenomena and landforms due to frost heaving in central Yakutia. *Biuletyn Peryglacjalny* 23, 135–155.
15. Fedorov, A.N., Gavriliev, P.P., Konstantinov, P.Y., Hiyama, T., Iijima, Y., Iwahana, G., 2014. Estimating the water balance of a thermokarst lake in the middle of the Lena River basin, Eastern Siberia. *Ecohydrology* 7, 188–196.
16. Crate, Susan & Ulrich, Mathias & Habeck, Joachim & Desyatkin, Alexey & Desyatkin, Roman & Fedorov, Alexander & Hiyama, Tetsuya & Iijima, Yoshihiro & Ksenofontov, Stanislav & Mészáros, Csaba & Takakura, Hiroki. (2017). Permafrost livelihoods: A transdisciplinary review and analysis of thermokarst-based systems of indigenous land use. *Anthropocene*. 18. 89-104. 10.1016/j.ancene.2017.06.001.

17. Takakai, Fumiaki & Desyatkin, Alexey & López Caceres, Máximo Larry & Fedorov, Alexander & Desyatkin, Roman & Hatano, Ryusuke. (2008). CH₄ and N₂O emissions from a forest-alas ecosystem in the permafrost taiga forest region, eastern Siberia, Russia. *Journal of Geophysical Research*. 113. G02002. 10.1029/2007JG000521.)
18. Bosikov, N. P. (1991), *Evolution of Alases in Central Yakutia* (in Russian), 127 pp., Permafrost Inst., Siberian Div., Russ. Acad. of Sci., Yakutsk, Russia.
19. Yershov, E.D., 1991. Geocryological Map of Russia and Neighboring Republics, 1: 2,500,000 Scale. Moscow State University, Russian Ministry of Geology.
20. Schuur, E.A.G., McGuire, A.D., Schadel, C., Grosse, G., Harden, J.W., Hayes, D.J., Hugelius, G., Koven, C.D., Kuhry, P., Lawrence, D.M., Natali, S.M., Olefeldt, D., Romanovsky, V.E., Schaefer, K., Turetsky, M.R., Treat, C.C., Vonk, J.E., 2015. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature* 520 (7546), 171–179.
21. Romanovsky, V.E., Drozdov, D.S., Oberman, N.G., Malkova, G.V., Kholodov, A.L., Marchenko, S.S., Moskalenko, N.G., Sergeev, D.O., Ukraintseva, N.G., Abramov, A.A., 2010. Thermal state of permafrost in Russia. *Permafr. Periglac. Process.* 21 (2), 136–155.
22. Séjourné, A., Costard, F., Fedorov, A., Gargani, J., Skorve, J., Massé, M., Mège, D., 2015. Evolution of the banks of thermokarst lakes in Central Yakutia (Central Siberia) due to retrogressive thaw slump activity controlled by insolation. *Geomorphology* 241, 31–40.
23. Costard, F., Dupeyrat, L., Gautier, E., Carey-Gailhardis, E., 2003. Fluvial thermal erosion investigations along a rapidly eroding river bank: application to the Lena River (Central Siberia). *Earth Surf. Process. Landf.* 28, 1349–1359.
24. Karl, T.R., Arguez, A., Huang, B., Lawrimore, J.H., McMahon,

J.R., Menne, M.J., Peterson, T.C., Vose, R.S., Zhang, H.-M., 2015. Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus. *Science* .

25. Brown, R.D., Derksen, C., 2013. Is Eurasian October snow cover extent increasing? *Environ. Res. Lett.* 8 (2), 024006.

26. Derksen, C., LeDrew, E., 2000. Variability and change in terrestrial snow cover: data acquisition and links to the atmosphere. *Prog. Phys. Geogr.* 24 (4), 469–498.

27. IPCC, 2013. Climate change 2013: the physical science basis. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

28. Boike, Julia & Grau, Thomas & Heim, Birgit & Günther, Frank & Langer, Moritz & Muster, Sina & Gouttevin, I. & Lange, Stephan. (2016). Satellite-derived changes in the permafrost landscape of central Yakutia, 2000–2011: wetting, drying, and fires.

29. Zhang, T., Barry, R. G., Knowles, K., Heginbottom, J. A., and Brown, J.: Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere, // *Polar Geogr.*, 1999, V.23, P.132–154.

30. Hugelius, G., Strauss, J., Zubrzycki, S., Harden, J. W., Schuur, E.A. G., Ping, C.-L., Schirrmeister, L., Grosse, G., Michaelson, G. J., Koven, C. D., O'Donnell, J. A., Elberling, B., Mishra, U., Camill, P., Yu, Z., Palmtag, J., and Kuhry, P.: Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps// *Biogeosciences*, 2014, V.11, P. 6573–6593.

31. Ballantyne, A. P., Alden, C. B., Miller, J. B., Tans, P. P., and White, J. W. C.: Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years // *Nature*, 2012, V.488, P.70–72.

32. Johansson, M., Callaghan, T. V., Bosiö, J., Åkerman, H. J., Jackowicz-Korczynski, M., and Christensen, T. R.: Rapid responses of permafrost and vegetation to experimentally increased snow cover in sub-arctic Sweden, *Environ. Res. Lett.*, 8, 035025, 2013.

33. Biskaborn, B. K., Smith, S. L., Noetzli, J., Matthes, H., Vieira, G., Streletskiy, D. A., Schoeneich, P., Romanovsky, V. E., Lewkowicz, A. G., Abramov, A., Allard, M., Boike, J., Cable, W. L., Christiansen, H. H., Delaloye, R., Diekmann, B., Drozdov, D., Etzelmüller, B., Grosse, G., Guglielmin, M., Ingeman-Nielsen, T., Isaksen, K., Ishikawa, M., Johansson, M., Johannsson, H., Joo, A., Kaverin, D., Kholodov, A., Konstantinov, P., Kröger, T., Lambiel, C., Lanckman, J.-P., Luo, D., Malkova, G., Meiklejohn, I., Moskalenko, N., Oliva, M., Phillips, M., Ramos, M., Sannel, A. B. K., Sergeev, D., Seybold, C., Skryabin, P., Vasiliev, A., Wu, Q., Yoshikawa, K., Zheleznyak, M., and Lantuit, H.: Permafrost is warming at a global scale // *Nat. Commun.*, 2019, V.10, P.264.

34. Schirrmeister, L., Froese, D., Tumskey, V., Grosse, G., and Wetterich, S.: Yedoma: Late Pleistocene ice-rich syngenetic permafrost of Beringia // *Encyclopedia of Quaternary Science*, 2013, V. 2, P. 542–552.

35. Schuur, E. A. G., Bockheim, J., Canadell, J. G., Euskirchen, E., Field, C. B., Goryachkin, S. V., Hagemann, S., Kuhry, P., Lafleur, P. M., Lee, H., Mazhitova, G., Nelson, F. E., Rinke, A., Romanovsky, V. E., Shiklomanov, N., Tarnocai, C., Venevsky, S., Vogel, J. G., and Zimov, S. A.: Vulnerability of Permafrost Carbon to Climate Change: Implications for the Global Carbon Cycle, *BioScience*, 58, 701–714, 2008.

36. Strauss, J., Schirrmeister, L., Grosse, G., Wetterich, S., Ulrich, M., Herzsuh, U., and Hubberten, H.-W.: The deep permafrost carbon pool of the Yedoma region in Siberia and Alaska // *Geophys. Res. Lett.*, 2013, V. 40, P.6165–6170.

37. Morgenstern, A., Grosse, G., Günther, F., Fedorova, I., and Schirrmeister, L.: Spatial analyses of thermokarst lakes and basins in Yedoma

landscapes of the Lena Delta, *The Cryosphere*, 5, 849–867, <https://doi.org/10.5194/tc-5-849-2011>, 2011.

38. Nikrad, Mrinalini & Kerkhof, Lee & Häggblom, Max. (2016). The subzero microbiome: Microbial activity in frozen and thawing soils. *FEMS Microbiology Ecology*. 92. fiw081. 10.1093/femsec/fiw081.

39. Graham DE, Wallenstein MD, Vishnivetskaya TA et al. Microbes in thawing permafrost: the unknown variable in the climate change equation. *ISME J* 2012;6: 709-12.

40. Elberling B, Brandt KK. Uncoupling of microbial CO₂ production and release in frozen soil and its implications for field studies of arctic C cycling. *Soil Biology and Biochemistry* 2003;35: 263-72.

41. Guicharnaud R, Arnalds O, Paton GI. Short term changes of microbial processes in Icelandic soils to increasing temperatures. *Biogeosciences*, 2010;7: 671-82.

42. Monson RK, Lipson DL, Burns SP et al. Winter forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition. *Nature*. 2006;439: 711-4.

43. Anderson OR. Bacterial and heterotrophic nanoflagellate densities and C-biomass estimates along an Alaskan tundra transect with prediction of respiratory CO₂ efflux. *The Journal of Eukaryotic Microbiology* 2014;61: 11-6.

44. Karhu K, Auffret MD, Dungait JAJ et al. Temperature sensitivity of soil respiration rates enhanced by microbial community response. *Nature* 2014;513: 81-4.

45. Alexander N. Fedorov, Go Iwahana, Pavel Y. Konstantinov, Takashi Machimura, Radomir N. Argunov, Peter V. Efremov, Larry M.C. Lopez and Fumiaki Takakai. Variability of Permafrost and Landscape Conditions Following Clear Cutting of Larch Forest in Central Yakutia. *Permafrost and Periglac. Process*. 2016.

46. Windirsch et al. Organic carbon characteristics in ice-rich permafrost in alas and Yedoma deposits, central Yakutia, Siberia. *Biogeosciences*, 17, 3797–3814. 2020.

47. С.А. Правкин Д.Ю. Большиянов, О.А. Поморцев, Л.А. Савельева, А.Н. Молодков, М.Н. Григорьев, Х.А. Арсланов. Рельеф, строение и возраст четвертичных отложений долины р. Лены в Якутской излучине. *Вестник СПбГУ. Науки о Земле*. Т. 63. Вып. 2. 2018.

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт фундаментальной биологии и биотехнологии

Базовая кафедра биотехнологии

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 Т.Г. Волова

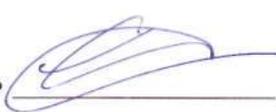
подпись

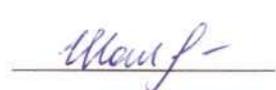
«24» июня 20 22 г.

БАКАЛАВРАСКАЯ РАБОТА

06.03.01 Биология

Гетеротрофная активность мерзлотных почв Центральной Якутии

Руководитель  к. б. н., доцент С.Ю. Евграфова

Выпускник  А.В. Шалагина

Красноярск 2022