

Санкт-Петербургский государственный университет

ТИМИРОВА Дарья Тимуровна

Выпускная квалификационная работа

**Оценка сезонного промерзания почв в районах распространения
многолетнемерзлых пород на примере Тункинской котловины
(Республика Бурятия) по данным георадиолокации**

Уровень образования: бакалавриат

Направление 05.03.02 «География»

Основная образовательная программа СВ.5019.2018 «География»

Профиль «Геоморфология и палеогеография»

Научный руководитель:

к. г.-м. н., доцент кафедры геофизики

Кашкевич М.П.

Рецензент:

младший научный сотрудник,

отдел географии полярных стран ААНИИ

Борисик А.Л.

Санкт-Петербург

2022

Оглавление	
ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1. Многолетнемерзлые породы и методы их исследования	5
1.1 Развитие ММП на территории России	5
1.2. Необходимость изучения ММП	7
1.3. Разрушительные явления при деградации ММП	11
1.4. Методы изучения ММП	18
Глава 2. Георадиолокация.....	23
2.1. Физические основы метода.....	23
2.2. Аппаратура для георадиолокационных исследований и методика работ	24
2.3. Обработка данных георадиолокации	26
2.4. Роль георадиолокации при исследовании ММП (на примере других объектов).....	33
Глава 3. Характеристика Тункинской котловины.....	36
3.1. Климат	37
3.2. Геологическое строение	39
3.3. Геоморфологические особенности	43
3.4. Гидрография	44
3.5. Хозяйственная деятельность	46
3.6. Мерзлота	48
3.7. Почвы	49
Глава 4. Результаты георадиолокации при исследовании ММП Тункинской котловины	50
4.1. Объект «Залежь»	53
4.2. Объект «Ельник».....	58
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	63
Список использованных источников и литературы	64

ВВЕДЕНИЕ

Территория Тункинской котловины относится к южной границе развития многолетнемерзлых пород (ММП) России. Здесь распространена преимущественно островная мерзлота с присутствием таликов. Территория Тункинской котловины долгое время подвергалась антропогенному вмешательству, что привело к изменениям в мерзлотных приповерхностных грунтах. Местами мерзлота полностью деградировала под воздействием сельскохозяйственной деятельности человека.

На фоне тренда роста температур Восточной Сибири, а также антропогенной нагрузки на территории с развитием многолетнемерзлых пород, важно изучать положение границ мерзлых пород. Изменения в структуре мерзлых грунтов и их таяние ведут к возникновению опасных геологических процессов и явлений, что негативно влияет на инженерные строения на ММП. Это обуславливает актуальность и практическую значимость данной работы, которая посвящена вопросам распространения многолетнемерзлых пород, а также проблеме ее изучения, картирования и мониторинга.

Цель работы - оценка степени промерзания и оттаивания грунтов Тункинской котловины (Республика Бурятия) по данным георадиолокации для участков с различными ландшафтно-геоморфологическими условиями.

Задачи:

1. Изучение вопросов распространения многолетнемерзлых пород, их особенностей развития на территории Республики Бурятия;
2. Обзор проблем, возникающих в ходе хозяйственной деятельности человека на территориях развития островной мерзлоты;
3. Изучение строения Тункинской котловины как модельного объекта развития многолетней мерзлоты разного типа;

4. Освоение георадиолокации как метода изучения многолетнемерзлых пород (методика полевых работ и обработка данных):
- обработка временных разрезов и годографов отраженной волны, полученных методом общей глубинной точки (ОГТ), в ПО Prism2;
 - получение значений диэлектрической проницаемости для слоев, скоростей распространения э/м волн, получение глубинных разрезов;
 - построение геолого-геофизических разрезов по обработанным данным.

Благодарности. Автор благодарен своему научному руководителю к.г.-м.н., доценту, М.П.Кашкевич за предоставленные георадиолокационные данные, а также помощь при их обработке и написании этой работы. Также автор признателен коллективу ООО “ГеофизПоиск” за радушный прием в стенах офиса.

Глава 1. Многолетнемерзлые породы и методы их исследования

1.1 Развитие ММП на территории России

Многолетнемерзлые породы (ММП) обычно называют многолетней мерзлотой. Они представляют собой любое вещество, которое находится ниже земной поверхности, при этом температура вещества должна сохраняться на протяжении двух или более лет в отрицательном диапазоне, а часть воды находится в кристаллическом состоянии. Помимо ММП, содержащих лед, в пределах криолитозоны встречаются также морозные породы, имеющие отрицательные температуры, но не содержащие льда из-за малой влажности, и криопэги - горизонты сильноминерализованных подземных вод, не промерзающие при минусовых температурах из-за высокой минерализации (Анисимов и др., 2012).

Криолитозона занимает более чем 11 млн. км² территории России, что равно примерно 65% площади страны (рисунок 1). ММП России распространены на северо-восточной части Кольского полуострова, протягиваются небольшой полосой на восток по северному побережью европейской части континента и расширяются по площади к Уралу. Южная граница распространения ММП в Западной Сибири находится почти в широтном направлении вплоть до Среднего Приобья. Максимальные площади ММП занимают к востоку от Енисея, охватывая всю Среднюю и Восточную Сибирь, Дальний Восток, Забайкалье, горы Алтае-Саянской горной страны. Также мерзлота распространена на всех арктических островах и шельфе полярного бассейна (Анисимов и др., 2012).



Рисунок 1. Зоны распространения различных типов ММП на территории России (Circum-arctic map...[Электронный ресурс], дата обращения: 02.05.2022).

ММП, в зависимости от их площадного распространения и сомкнутости, выделяют на следующие группы: области сплошного распространения, когда ММП занимают 90% площади; прерывистого - 50—90% площади, островного (10—50%) и редкоостровного (менее 10%) распространения, между которыми можно провести условные границы. ММП в России имеют сплошное распространение на площади в 7 млн. км², прерывистое распространение на 1,8 млн. км², островное и редкоостровное на 2,5 млн. км². Наибольшие мощности мерзлых толщ до 1500 м наблюдаются в горах Бырранга на полуострове Таймыр и на Среднесибирском плоскогорье. В области

сплошного распространения ММП их мощности достигают 100-800 м, в области прерывистого — 25-100 м, в области островного — 10-50 м. В горах Бырранга, в Средней Сибири, на севере Якутии наблюдаются самые низкие среднегодовые температуры ММП. Они варьируют от -12 до -15°C . В областях сплошного распространения ММП диапазон среднегодовой температуры составляет $-3...-9^{\circ}\text{C}$, в области прерывистого распространения $-1...-3^{\circ}\text{C}$ и в области островного распространения $0^{\circ}...-2^{\circ}\text{C}$. В южной части Восточной Сибири проходит южная граница криолитозоны. В ней выделяют мерзлотную провинцию южной части Сибирской платформы и провинцию ММП Байкальской горно-складчатой зоны (Лещиков, 1968).

В России наблюдения за ММП имеют самую длительную историю. Впервые измерения температуры мерзлых грунтов провели в 1837 г. в Якутии в пробуренной скважине. В 1844 г. А. Миддендорф во время экспедиции установил термометры на разных глубинах внутри пробуренной скважины и организовал периодические (2—5 раз в месяц) измерения, которые длились более чем 50 лет. Полученные измерения были использованы Г. Вильдом в 1882 г. для создания термической модели, что позволило определить южные границы криолитозоны России (Permafrost observations...).

1.2. Необходимость изучения ММП

ММП занимают значительную часть площади суши и шельфа России, они создают специфические условия на территориях, на которых распространены, что требует особого внимания к их изменению для сельского хозяйства, нефте- и газодобычи, добыче других полезных ископаемых, строительства зданий, дорог, прокладки трубопроводов, кабелей, бурения скважин. Поэтому при любых видах строительства в пределах распространения ММП важно учитывать их свойства, особенно при тенденции изменения климата и оттаивании мерзлоты. Для сельского хозяйства мерзлота может как ограничивать посадку определенных культур, так и позволять выращивать те виды, которым необходима влага при сезонных

оттайках грунта. В мерзлых грунтах находятся дремлющие бактерии, вирусы, различные микроорганизмы, которые при оттаивании могут становиться причинами эпидемий, например, как сибирская язва в телах мамонтов в мерзлоте (Большая российская...[Электронный ресурс] дата обращения 11.05.2022). Для коренных жителей севера оттаивание мерзлоты приведет к изменению их уклада жизни, поиску новых пастбищ для оленеводства (Буффар и др., 2021).

Активный интерес к криолитозоне в настоящее время появляется во многом из-за глобального потепления и связан с двумя факторами. Первый - увеличение температур ММП, которое приводит к образованию термокарстовых просадок поверхности почв, увеличению влияния береговой эрозии на рельеф и другим разрушительным изменениям. Слабая устойчивость криолитозоны к изменениям климата и техногенным нагрузкам во многом обусловлена наличием подземных льдов. Оттаивание ММП влияет на естественные ландшафты, приводит к разрушению лесов, заболачиванию местности (Судакова и др., 2018). Другая причина - предполагаемое увеличение выбросов парниковых газов из газовых гидратов при таянии мерзлоты. Этот аспект еще находится в процессе изучения, поскольку одни ученые считают влияние газов значительным, что, предположительно, приведет к усилению глобального потепления к концу века. Другие ученые, в частности Анисимов О.А. и др. (2004) считают, что влияние парниковых газов на изменения климата не будет значительным.

Строительство зданий и линейных объектов на мерзлоте должно учитывать ее особенности, потому что при таянии мерзлые грунты способны менять свои свойства: песчаник, галечник, суглинки относятся к пучинистым породам. Сооружения, которые построены на мерзлоте, способны нагревать грунт, на котором стоят, грунт теряет монолитность, начинает подтаивать и приводить его в движение. Шепелев В.В. и др. (2000) считают деятельность человека главной причиной деградации мерзлоты из-за нарушений правил ведения хозяйственной деятельности и урбанизации территорий

распространения ММП. Хозяйственная деятельность и потепление климата являются главными причинами увеличения температур грунтов. Увеличение площадей городских агломераций, заасфальтированности территории, появления дорог приводят к тому, что мерзлые толщи перекрывают сток надмерзлотных вод, при этом крышка в виде строений не дает этой воде испаряться. Из-за этого появляется заболачивание урбанизированных территорий, что приводит к подтоплениям и заболачиванием городов (Шепелев и др., 2000).

Деграция ММП в городах является следствием множества факторов, которые так или иначе связаны с человеком. На растепление грунтов влияет загрязнение территорий, разрушение естественных ландшафтов, нарушение миграций поверхностных и грунтовых вод, несоблюдение условий прокладки ливневок, коллекторов сточных вод, что влияет на аварии в них и тепловому воздействию на лежащие вокруг грунты. Все эти факторы в совокупности и при длительном воздействии способны менять картину деграции мерзлоты, что по итогу приведет к тому, что здания, построенные по одним стандартам, будут разрушаться, потому что со временем мерзлота под ними меняет свои свойства (Шац, 2010). Один из примеров - подтаивание мерзлоты под полотнами автомобильных трасс в зонах распространения ММП. Грунтовая дорога, связывающая Салехард с Аксаркой, после ремонта и асфальтирования и бетонирования, стала на отдельных участках трассы проседать, не выдерживая нагрузки многотонных грузовиков, которые ездили по ней на высоких скоростях. Высокие скорости и большая нагрузка на полотно стали причиной оттаивания мерзлоты под ней. Другой пример - это принципы строительства зданий на мерзлоте. Обычно дома строятся на сваях, которые не дают мерзлоте нагреваться, забирая тепло здания, но зачастую эти правила игнорируются и происходит растепление мерзлых грунтов, что приводит к разрушениям зданий. То есть в локальных размерах оттаивание мерзлоты зависит от строений, которые на ней расположены (Мерзлоте закон не писан...[Электронный ресурс], дата обращения 05.05.2022).

Хозяйственная деятельность также влияет на оттаивание мерзлоты. Она способна менять альbedo поверхности используемой земли, что приводит к повышению температуры грунтов. Многолетняя мерзлота на торфяных буграх может деградировать из-за нарушения поверхности грунтов человеком, удаления с них растительности, выпаса скота (Конищев, 2009). Также влияние на оттаивание мерзлоты оказывает добыча полезных ископаемых и их переработка. Промышленные утечки из коммуникаций, трубопроводов и оседание частиц при переработке приводят к засолению грунтов легкорастворимыми солями натрия, магния и кальция. Засоление, в свою очередь, способно изменять состояние грунта из твердого в пластичное или вовсе не мерзлое. В Российской Арктике находится большое количество городов, поселков, портов, транспортных артерий, которые влияют на деградацию мерзлоты. Мерзлота при оттаивании, в свою очередь, активно разрушает постройки. Как пример - обводненность города Якутска. Территория города заболачивается последние 50 лет, при этом происходит изменение состава отложений из-за утечек (Шац, 2010).

Образование такого процесса, как термокарст связано не только с естественными факторами, но также и с антропогенными, такими как вырубки леса, лесные пожары, сельское хозяйство. Пожары могут влиять на баланс воды и свойства грунтов, такие как альbedo, влажность, плотность, скорость испарения. Также при пожарах уничтожается подстил из мхов и лишайников, что также может менять температуры грунтов летом, а их льдистость зимой. Все это может становиться причинами развития термокарста (Геоэкология, 2011). Тему пожаров, как причину увеличения мощностей сезонно-талого слоя затрагивают в своем исследовании Ponomarev et al. (2020). При пожарах уничтожается мохово-лишайниковый слой, а также древостой, а после этого на протяжении 7-10 лет на участках пожарищ сохраняются температурные аномалии из-за потери грунтами теплоизоляционных свойств. Это становится причиной деградации верхнего слоя ММП (Ponomarev et al., 2020).

Таким образом, важно отметить, что изучать ММП необходимо, поскольку естественные и антропогенные причины приводят к ее деградации, что впоследствии может стать причиной изменений на Земле в локальном и глобальном масштабе.

1.3. Разрушительные явления при деградации ММП

Говоря о разрушительной силе ММП при их оттаивании хочется затронуть тему строительства и аварийных ситуаций, связанных с мерзлотой. Я. А. Кроник (2016) проанализировал статистику аварийности сооружений в районах распространения ММП и пришел к выводу, что наблюдается тренд роста аварий и деформаций на объектах с каждым новым годом. На рисунке 1 представлена карта деградации и прогноза деградации ММП на территории РФ в 1950-2050 гг. Повышение температуры окружающей среды ведет к тому, что ММП переходят из твердомерзлого состояния к пластичномерзлому или немерзлому. Анисимов и др. (2012) проанализировали тенденцию изменения температуры воздуха, осадков в разные периоды года и составили карту потенциальных геокриологических опасностей, которые могут возникать или уже возникают при современном климате. На карте показаны территории с сильной, умеренной и слабой степенью активизации криогенных геологических процессов в летний и зимний периоды. Авторы делают вывод, что на 25% территории криолитозоны РФ достаточно стабильные условия климата, а также слабое проявление опасных явлений, связанных с ММП. Для 10% территории условия климата неблагоприятные, что приводит к сильной высокой степени активизации процессов в мерзлоте. Для остальных 65% все данные находятся в умеренных границах показателей (Анисимов и др., 2012)

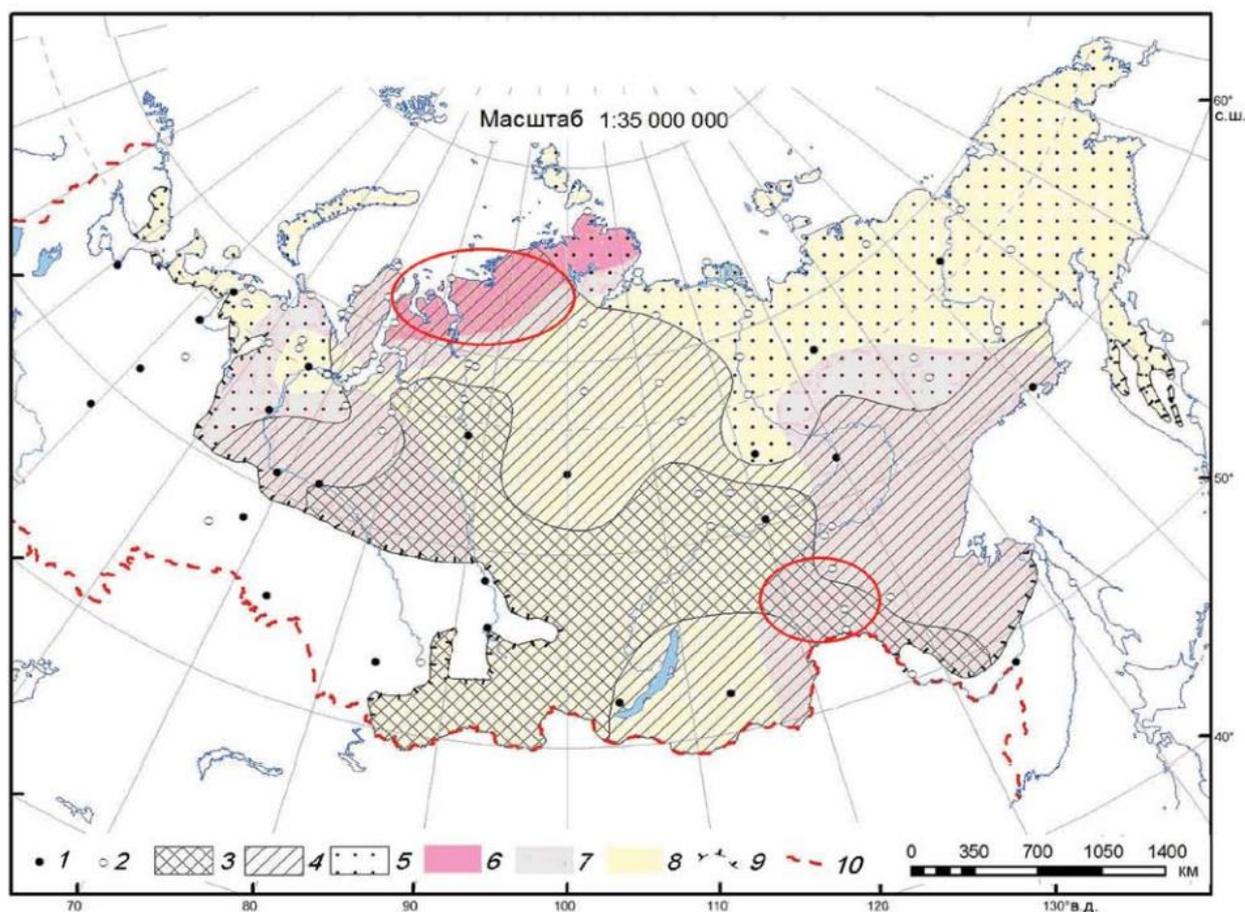


Рисунок 2. Карта потенциальных геокриологических опасных явлений при изменении современного климата. Точки наблюдения с периодом 1) более 100 лет, 2) менее 100 лет; степень активизации криогенных процессов в холодный период: 3) сильная, 4) средняя, 5) слабая; в холодный период: 6) сильная, 7) средняя, 8) слабая (Анисимов и др., 2012).

Одно из опасных криогенных явлений - морозное пучение. Пучение грунтов возникает в районах развития ММП и несет большую опасность и множество проблем, связанных со строительством и эксплуатацией объектов инфраструктуры. Неравномерность пучения грунтов обычно приводит к тому, что построенные здания, дороги, трубопроводы попадают в аварийные ситуации. Например, строительство железнодорожной дороги Чум - Салехард - Игарка, длина которой должна была составить почти полторы тысячи километров, так и не закончилось, хотя активно велось в прошлом веке. Для насыпи использовали такие грунты, как глины, суглинки, супеси, пылеватые пески, которые имеют пучинистые свойства. Одной из причин, по которой

строительство дороги стало невозможным, стало пучение грунтов, что привело к неравномерным просадкам и воздыманиям участков с уже проложенным полотном (рисунок 3), (Мертвая дорога...[Электронный ресурс]. Дата обращения: 28.04.2022).



Рисунок 3. Состояние недостроенной железной дороги Чум — Салехард — Игарка на участке с буграми пучения (Заброшенная железная...[Электронный ресурс], дата обращения: 29.04.2022).

Принципиальным отличием линейных сооружений, например, железных дорог, или даже протяженных зданий, является то, что для их нормальной эксплуатации необходимо, чтобы неизбежное воздействие криогенных процессов, таких как термокарстовые просадки при сезонном оттаивании или пучение грунта при промерзании, было равномерным на единицу длины сооружения. При этом условии даже высокие интенсивности этих процессов не столь опасны. В противном случае могут возникнуть значительные деформации. Например, строительство и эксплуатация Байкало–Амурской железнодорожной магистрали сопровождалась и сопровождается сейчас деформациями дороги (рисунок 4).



Рисунок 4. Полотно БАМа с деформациями из-за пучения грунта (Оценочный отчет..., 2009).

Деформации при оттаивании мерзлоты происходят также и на автомобильных дорогах, приводя к их непригодности (рисунок 5 и 6).



Рисунок 5. Разрушение дороги в результате морозного пучения (Гулин и др., 2022).



Рисунок 6. Смещение кювета из-за оттаивания мерзлоты (Чернышева и др., 2016).

Разрушительные действия могут происходить в том числе с бытовыми постройками: домами, сараями, которые построены на пучинистых грунтах (рисунок 7).



Рисунок 7. Разрушение здания при пучении грунта (Гулин и др., 2022).

Также важно сказать о добыче полезных ископаемых в зонах распространения ММП. А.П. Дубинин в своей статье (2015) обращает внимание на то, что при эксплуатации Чаяндинского нефтегазоконденсатного месторождения происходит повышение температуры ММП и их оттаивание. Как следствие этого - загрязнение буровым раствором водоносных горизонтов, порча оборудования для бурения и деформация скважины. Если устья скважин располагаются близко друг к другу, это приводит к просадкам грунта, обвалам. При зачистке местности для бурения вырубаются лесные массивы, убирается верхний слой почв, что также приводит к повышению температуры всего верхней части массива ММП на 1-1,5 °С. Именно поэтому очень важно вести наблюдения за ММП, заниматься мониторингом и систематическим контролем за бурением скважин в районах развития ММП (Дубинин, 2015).

Аварийность растет не только при добыче, но и при транспортировке нефти и газа. Зачастую трубопроводы располагаются под землей и, как

следствие, в районах распространения ММП подвергаются криогенным процессам, из-за чего возникают аварии на трубопроводах. Один из них - это то же пучение грунтов, из-за чего появляются бугры пучения и морозобойные трещины. Они приводят к деформациям фундаментов к деформациям и перемещениям свайных фундаментов на магистральных трубопроводах. Одним из примеров является появление бугров пучения пучения в районе агрегатов воздушного охлаждения (АВО) газа около 2 метров радиусом и высотой около 1 метра (рисунок 6). Устранять бугор удастся при помощи вскрытия верхней части бугра. После этого происходил напор вод из горизонта в верхней части ММП. В летний период этот бугор пучения опускался на горизонтальный уровень, оседая благодаря оттаиванию сезонно-мерзлого слоя. Авторы обращают внимание на то, что обеспечение безаварийной работы, эксплуатации трубопроводов требует знания свойств ММП, их поведения при различных температурных условиях и ряде других факторов, которые связаны со свойствами ММП (Гулин и др., 2022).



Рисунок 8. Бугор пучения на площадке АВО, вскрытый разгрузочной скважиной (Арабский и др., 2017)

Гринпис, говоря о влиянии таяния ММП (Оценочный отчет..., 2009) в Норильском промышленном районе, приводит следующую статистику на 2009 год: около 250 сооружений имеют деформации, которые зависят от состояния ММП, более 40 жилых домов или снесены, или планируется снести. В 2020 году произошел разлив топлива под Норильском, что стало крупнейшей экологической катастрофой в российской Арктике (рисунок 9). Одной из предполагаемых причин компания “Норникель” назвала таяние ММП, что привело к тому, что опоры, на которых была установлена цистерна с топливом, просели. Человеческий фактор при этом исключается, как заявил Сергей Дяченко, операционный директор компании, в интервью Русской службы BBC News (Деградация вечной мерзлоты... [Электронный ресурс], дата обращения 02.05.2022).



Рисунок 9. Разлив топлива в одной из рек под Норильском (Потанин: "Норникель"... [Электронный ресурс], дата обращения 02.05.2022).

Зачастую причиной аварий или неполадок на объектах становится именно нарушение опор, например, на рисунке 10 показано влияние пучения грунтов на состояние линий электропередач при деградации ММП.



Рисунок 10. Крен опоры ЛЭП северного региона из-за повреждения фундамента в результате морозного пучения ММП (Каверина, 2016).

1.4. Методы изучения ММП

Многолетняя мерзлота требует обширных работ по ее изучению.

Исследования ММП производятся экспедиционным (рекогносцировочным) и стационарным методами. При первом методе изучение происходит только в теплую часть года, второй метод ограничен территориально, но ведется в на протяжении всего года в течение долгого периода времени. В разрезе разных наук исследование ММП занимает важную роль, ввиду их распространенности на территории страны.

Термометрия. В современное время данные о изменениях криолитозоны черпаются при помощи четырех способов:

1. замеры температуры почвы на глубинах до 3,2 м на метеорологических станциях;
2. измерения температуры в скважинах;
3. измерения мощности сезонно-талого слоя (СТС)
4. комплексные измерения на геокриологических стационарах.

1. На большинстве метеостанций в РФ проводят измерения температуры почвы на глубине до 3,2 м. Эти данные используются для анализа температуры разных слоев ММП. Эти данные позволяют узнать, на какой глубине находится граница с нулевой отметкой значения температуры, которая показывает мощность сезонно-талого слоя (СТС). Плюс этого метода заключается в том, что метеостанции имеют большое площадное распространение по территории страны, а минусом то, что такие измерения грунтов для уточнения СТС не всегда корректны из-за растительности района и его ландшафтов.
2. Наблюдения за температурой ММП в скважинах имеют огромное значение: позволяют найти глубину нулевой годовой амплитуды, предположить глубину кровли и подошвы, предсказать вероятность появления подмерзлотных вод. Температура мерзлоты измеряется в воздушно-сухих или обсаженных и заполненных антифризом скважинах, которые закрываются сверху. На 2012 год наблюдательная сеть, которая включала в себя данные о всех скважинах в России, где велись замеры температуры, включала 161 скважину в разных уголках страны. Сравнение данных из скважин с архивными данными показало, что температура ММП в большинстве точек растет последние десятилетия.
3. В 1990 г. была создана программа циркумполярного мониторинга деятельного слоя ММП (Circumpolar Activelayer Monitoring). В основе лежит выбор мест, где будут получены результаты целостной региональной и локальной картины состояния СТС. Данные собираются на пяти разных уровнях: глобальном, региональном, ландшафтном, фациальном, дистанционном. По данным на 2012 год, на территории России в разное время было организовано 49 площадок, осуществляющих наблюдения по стандартизированной методике в программе CALM. Наблюдения от 10 и более лет ведутся только на 20 из них.

4. На 2012 год геокриологических стационаров осталось около 30, при том, что до 1990 годов их количество было более 100. Эти стационары как выполняют оценки настоящих данных, так и их прогноз на будущее. Измерениям подвергаются температура воздуха, снежный покров, количество осадков, уровень воды в водотоках и водоемах, толщина льда, влажность грунтов, глубину сезонного промерзания и протаивания, деформации, которые происходят на поверхности земли (Анисимов и др., 2012).

Геоморфология. Распространение ММП на территории России велико, поэтому и велика роль криогенных процессов, которые формируют рельеф территорий. Мерзлота активно изучается геоморфологами, рассматривающими ее как фактор формирования разных форм рельефа. Основными процессами рельефообразования в районах распространения ММП являются пучение грунтов и образование наледей, криогенное выветривание и морозное растрескивание грунтов, морозная сортировка и солифлюкция. Они формируют различные микро- и мезоформы в зависимости от уклонов поверхности, состава грунтов, температуры и других факторов. Методы изучения ММП в геоморфологии базируются на наблюдениях за изменением рельефа мерзлотных территорий, деградацией ММП, которые приводят к возникновению иных форм рельефа, прогнозированию их появления и картографированию (Смолянинов, 2010).

Геоэкология. К мерзлотно-экологическому состоянию ландшафтов в областях распространения ММП применимы следующие методы:

1. метод ландшафтной индикации;
2. дешифрирование аэрокосмических снимков;
3. метод ландшафтно-структурного анализа, в том числе картографического ГИС-анализа;
4. метод экспертных оценок;

5. математические методы расчета, статистики, моделирования;
6. традиционные методы полевых и камеральных исследований (маршрутные наблюдения, химические анализы, определение свойств ММП) (Тумель, 2018).

Биогеография. С точки зрения биогеографии наблюдения за мерзлотой важно, чтобы исследовать жизнь животных, для которых почва является средой обитания: черви, личинки насекомых. В СТС изучаются ходы и норы землероев: места, которые они выбирают в ландшафте, почву, грунтовые воды, то, как животные обустривают свои жилища от внешних природных факторов и другие их повадки в течение года. Проводятся наблюдения за годовым циклом пресмыкающихся и амфибий, за жизнью обитателей водоемов, которые живут на незамерзающем дне (Справочник путешественника и краеведа, 1949).

Геофизика. Геофизические методы достаточно эффективны при картирование мерзлых и талых отложений, а также расчленении мерзлых и талых грунтов по глубине. При картировании выявляются литологические контакты, тектонические нарушения, трещиноватости, участки с подземными льдами, обводненными горизонтами. При расчленении определяется строение ММП, поиски подземных вод в ней, выявление глубины кровли и подошвы мерзлоты, выявление и изучение таликов. Для задач изучения мерзлотных процессов: динамики сезонных промерзаний и оттаек, пучений грунтов, термокарста, морозобойного растрескивания применяются специальные геофизические измерения. Также геофизические методы широко используются при поиске полезных ископаемых в районах распространения ММП. В районах распространения ММП проводить геофизические изыскания сложно по ряду причин. Например, использование метода преломленных волн в сейсмоакустике не является успешным, потому что упругая волна не проникает вглубь ниже мерзлых пород, а скользит по ее границе с талыми породами. Это не позволяет обнаружить подошву мерзлой породы.

Электроразведка при исследованиях ММП обладает дороговизной и сложностью при полевых работах, потому что в мерзлые грунты трудно устанавливать гальванические заземления, а сами ММП при этом обладают высоким удельным сопротивлением, что не дает току заводиться в землю. ММП можно успешно изучать методом георадиолокации, потому что в большинстве пород мерзлого типа хорошо распространяются электромагнитные волны (Владов и др., 2004).

Глава 2. Георадиолокация

2.1. Физические основы метода

Работа георадара строится на излучении электромагнитных волн высокой частоты и приеме сигнала при отражении от границ различных по физическим свойствам слоев в изучаемой среде (Дьяков и др., 2021). Двумя важнейшими величинами, на которых базируется метод георадиолокации, являются удельное затухание, которое позволяет узнать глубинность зондирования георадаром; скорость распространения электромагнитных волн в среде, которая нужна для перевода значений полученных наносекунд в метры или другие единицы расстояния до границ сред и объектов. Все вещества, за исключением чистых металлов, диэлектриками. При исследовании георадаром важным параметром среды является диэлектрическая проницаемость ϵ , которая влияет непосредственно на скорость V распространения волн в среде. При изучении ММП значение ϵ позволяет сказать, в каком состоянии находится та или иная среда, даже если нет данных скважины или горной выработки (Владов, 2004).

Скорость и диэлектрическая проницаемость состоят в следующей зависимости:

$$V=c/\sqrt{\epsilon}, \text{ где } c - \text{ скорость света, равная } 30 \text{ см/нс (Владов, 2004).}$$

Зная значения диэлектрической проницаемости для сред, мы можем пересчитать время на временных разрезах в расстояние, и таким образом получить глубины границ изучаемых сред. Кроме того, значение эпсилон свидетельствует об агрегатном состоянии воды. Диэлектрическая проницаемость воздуха равна 1, воды - 81. Все остальные значения проницаемости расположены между ними, при этом эпсилон будет различен для одной и той же породы при ее разной влажности или разном агрегатном состоянии воды (таблица 1). Чем больше влажность, тем выше ϵ . Лед же имеет ϵ около трех. Именно эта особенность воды позволяет нам определять мерзлость или немерзлость грунтов (Владов, 2004).

Тип	Влажность %	ϵ	Скорость V_{ϕ} [см/нс]
Пески разнородные	4	5	13
	8	7	11
	12	11	9
	16	15	8
Суглинок каштановый	5	4,0	15
	10	6,5	12
	20	10	10
Глина	4	5,4	13
	8	8	11
	12	12	9
	16	18,6	7
Торф мокрый		62-69	4
Бетон (500МГц)	0	3.7	16
	5	5.5	13
	10	7.0	11
Вода пресная		81	3,3
Снег сухой мокрый		1,2-2,8	18-27
		2-6	12-21
Лёд пресный (- 10°C)		3.3	17

Таблица 1. Сравнение типов сред, их влажности, диэлектрической проницаемости и скоростей распространения э/в в среде (Владов, 2004).

2.2. Аппаратура для георадиолокационных исследований и методика работ

Георадиолокационные исследования осуществляются с помощью специальных приборов – георадаров. Георадар – это геофизический прибор, который используется для выявления различных объектов в разных средах. Под каждую определенную задачу, формируется свой состав георадара.

Минимальный комплект прибора состоит из базового комплекта и антенного блока. Георадары активно применяют, чтобы изучать геологическое строение территории в областях распространения ММП, выявлять талики, мощности льда, затонувшие объекты, находить уровень грунтовых вод, исследовать профили дна болот, озер и рек, картировать талики, оползни. Также георадар позволяет решать задачи поискового типа, например, поиск захоронений, археологических объектов, трубопроводных сети, различных подземных кабелей, поиск людей при разрушении зданий (Владов, 2004).



Рисунок 11. Фото георадара “ОКО-2”. Из архива автора.

Для исследования в Тункинской котловине использовали георадар “ОКО-2” с антенным блоком АБ -150 (рисунок 11). Методика работ заключалась в съемке по профилям и съемке методом общей глубинной точки. При профилировании антенный блок, который состоит из излучателя и приемника, перемещают по исследуемой площадке по выбранному профилю. Расстояние между антеннами фиксируется. Все измерения записываются в память компьютера и после обрабатываются. При использовании метода ОГТ на выбранной территории проводится пробное сканирование разных участков для того, чтобы найти горизонтальный участок нужного слоя. Делается это для облегчения расчетов, потому что в таком случае не придется вводить угловую

переменную, которая будет возникать из-за того, что слой будет проходить относительно ЗП под каким-либо углом. После этого выбирается какая-либо общая глубинная точка этого слоя и над ней на поверхности помещают георадар, предварительно разделив антенны излучения и приема, протягивается мерная лента или рулетка на расстояние, которое будет изучаться. Далее делается начальная часть сканирования: записывается какое-либо количество трасс: от 10 до 20 для удобства последующей обработки. После этого обе антенны разносят симметрично в противоположные стороны на одно и то же расстояние, обычно оно равно 1 метру также для удобства подсчетов. После этого процедура с записью трасс вновь повторяется (Теория и методы..., 2008). Максимальный разнос антенн ограничивается длиной оптического провода, который синхронизирует генераторную и приемную антенну, в нашем случае - 20 м.

2.3. Обработка данных георадиолокации

Продуктом георадарной съемки являются радарограммы, на которых будут размещены полученные данные: по горизонтали расстояние в метрах, а по вертикали - время в наносекундах. При исследовании важно знать, на какой глубине находятся те или иные объекты или границы сред, а не время, за которое сигнал вернулся обратно. Для интерпретации полученных данных важно знать значения диэлектрической проницаемости или скорости распространения э/м волн в средах. Для этого есть три метода.

Первый метод - определение скорости по гиперболе дифрагированной волны. Этот метод используется тогда, когда нет данных скважины, горной выработки, другой априорной информации о средах, которые исследуются.

Дифракция электромагнитных волн - явление, когда волны отражаются от объекта, который по размерам равен или не превышает длину волны. Волны, которые отражаются при этом, называют дифрагированными. В основе метода лежит уравнение гиперболы дифрагированной волны:

$$t = (2\sqrt{(x^2 + h^2)}) / V \text{ (Владов и др., 2004).}$$

где h - глубина залегания объекта
 t - время между отражением сигнала и его приемом
 x - расстояние между георадаром и проекцией объекта на земную поверхность.

То есть форма гиперболы дифрагированной волны будет зависеть от глубины объекта в среде, а также от скорости электромагнитных волн. В этом методе в программе для обработки данных GeoScan32/Prism2 экспериментально совмещают теоретическую гиперболу с гиперболой дифрагированной волны, добиваясь того, чтобы они совпали. В итоге программа позволяет получить данные диэлектрической проницаемости ϵ для определенной среды. Метод является довольно простым, однако не очень точным.

На рисунках 12 и 13 представлены графики гипербол дифрагированной волны, рассчитанных экспериментально для разных гипотетических условий. На рисунке 12. по оси $У$ показано изменение времени при условии, что объекты находятся на разных глубинах, но среда, в которой они находятся, имеет одну и ту же диэлектрическую проницаемость. На рисунке 13 показано сранение гипербол отраженной волны для объекта, который находится на одной и той же глубине, однако меняется значение диэлектрической проницаемости сред, в которых он экспериментально помещается.

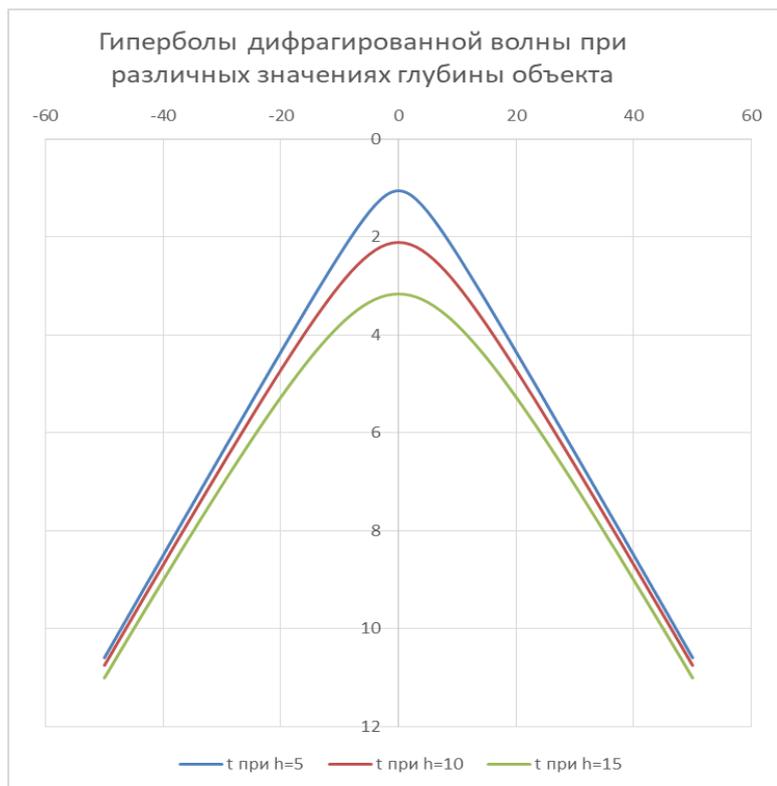


Рисунок 12. Сравнение гипербол дифрагированной волны при различных значениях глубины (x варьирует от -50 до 50, $\varepsilon = 10$).

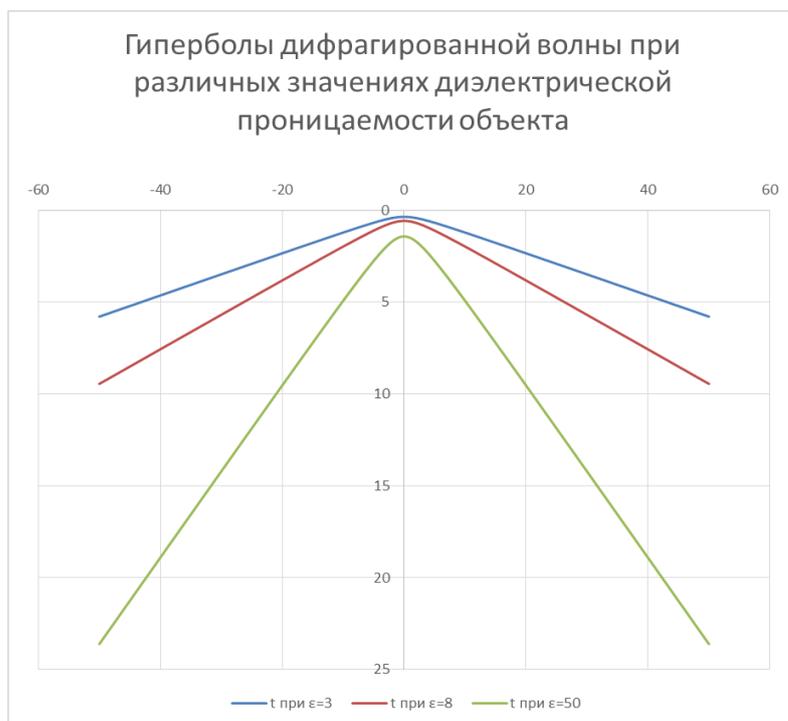


Рисунок 13. Сравнение гипербол дифрагированной волны при различных значениях диэлектрической проницаемости объекта на глубине 15м.

Второй способ - это метод общей глубинной точки. Этот метод применяется тогда, когда на радарограмме не оказывается дифрагирующих объектов, благодаря которым можно было бы использовать первый метод. Изначально этот способ является модификацией метода отраженных волн. Строится он на многократной регистрации и накоплении отражений от одного и того же объекта или границы при различных положениях приемника и излучателя. Метод обладает такими преимуществами, как защищенность от помех за счет того, что от одной точки идет большое количество отражения, подавление волн, которые отражаются многократно. Однако один из его недостатков - это довольно времязатратное полевое исследование, обработка и интерпретация результатов. Метод реализуется следующим образом: излучатель и приемник разносятся симметрично относительно проекции ОГТ на поверхность на разные расстояния (рисунок 14).

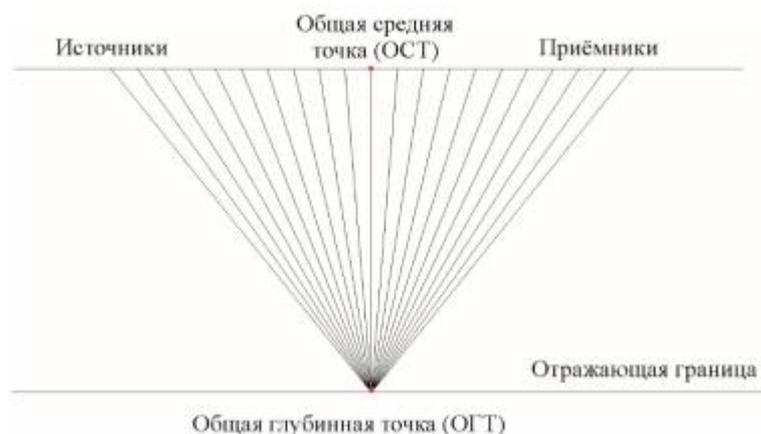


Рисунок 14. Схема метода ОГТ (Кинематика...[Электронный ресурс], дата обращения 10.05.2022).

Уравнение годографа ОГТ выглядит следующим образом:

$$t = (2\sqrt{((x/2)^2 + h^2)}) / V \text{ (Владов и др., 2004).}$$

Продуктом этого метода в георадиолокации является радарограмма ОГТ (рисунок 15).

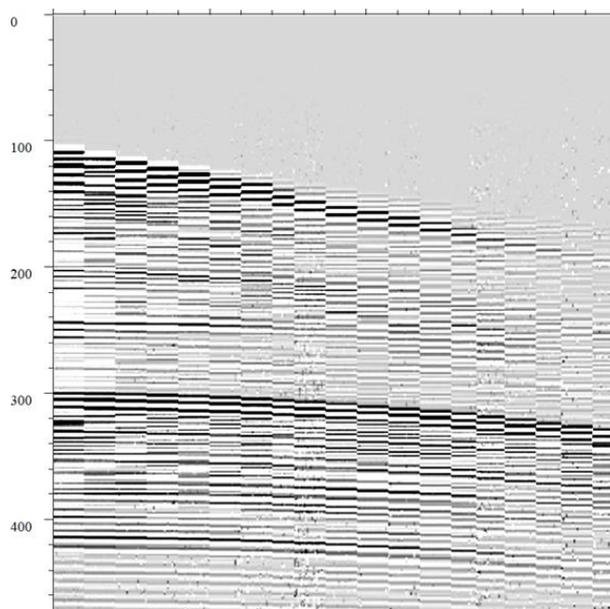


Рисунок 15. Радарограмма ОГТ, снятая на леднике в Антарктиде.

Полученные данные обрабатываются в ПО “Prism2”. Радарограмма, которая загружается в программу, требует некоторого редактирования для того, чтобы визуально все слои были различимы и имели границы. Это возможно при помощи инструмента “Усиление” на правой боковой панели. При помощи настройки экспозиции и фильтров в инструменте настраивается изображение, после этого оно будет готово к обработке. Для того, чтобы рассчитать диэлектрическую проницаемость и скорость э/м волны, понадобится инструмент “Годограф” (рисунок 16).

Введите слой	Начальная диэлектрическая проницаемость	Начальная толщина слоя (в метрах)	Модель
Air			3 слоя
1	5	1	Входные цвета: Синий
2	5	1	Выходные цвета: Желтый
3	5	1	Вычислить
4	5	1	Закреть
5	5	1	

Рисунок 16. Окно годографа в программе Prism2.

1. В поле “Модель” нужно выбрать число слоев, которые будут обрабатываться в программе.

2. В полях “Входные цвета” и “Выходные цвета” нужно выбрать любые удобные цвета для пикирования границ.
3. В разделе “Начальная диэлектрическая проницаемость” можно ввести значения предполагаемой диэлектрической проницаемости выбранного слоя. Стандартно стоит значение 5, программа способна провести расчеты и при этих данных.
4. Это же касается раздела “Начальная толщина слоя”. Изначально поля имеют значения 1 метр толщины. Их можно не менять, но если программа не может вывести расчеты, нужно будет ввести предполагаемое значение.
5. Далее нужно ввести положение воздушной волны одной точкой, которая будет располагаться как можно дальше от начала годографа. Чтобы это сделать, нужно нажать на кнопку “Air” в разделе “Введите слой”. При этом в поле расстояния надо ввести известные данные о расстоянии, на котором находилась приемная антенна от источника для выбранной точки.
6. После нажатием на цифру 1 в разделе “Введите слой” вводится граница первого слоя (первая граница начинается сверху от земной поверхности) нужно выбирать данные так, как это делалось при выборе воздушной волны, но уже в каждой из набора трасс. Также важно вводить корректные априорные значения расстояния для каждой указанной точки.
7. Точно по такой же технологии обрабатываются остальные границы. После этого нажимается кнопка “Вычислить” и программа производит вычисления и выдает результат. Окно программы после всех этих действий представлено на рисунке 17. В качестве пробной обработки был использован годограф, полученный в ходе метода ОГТ в Антарктиде. Это было полезно, потому что во льдах все границы четко различимы и видимы.

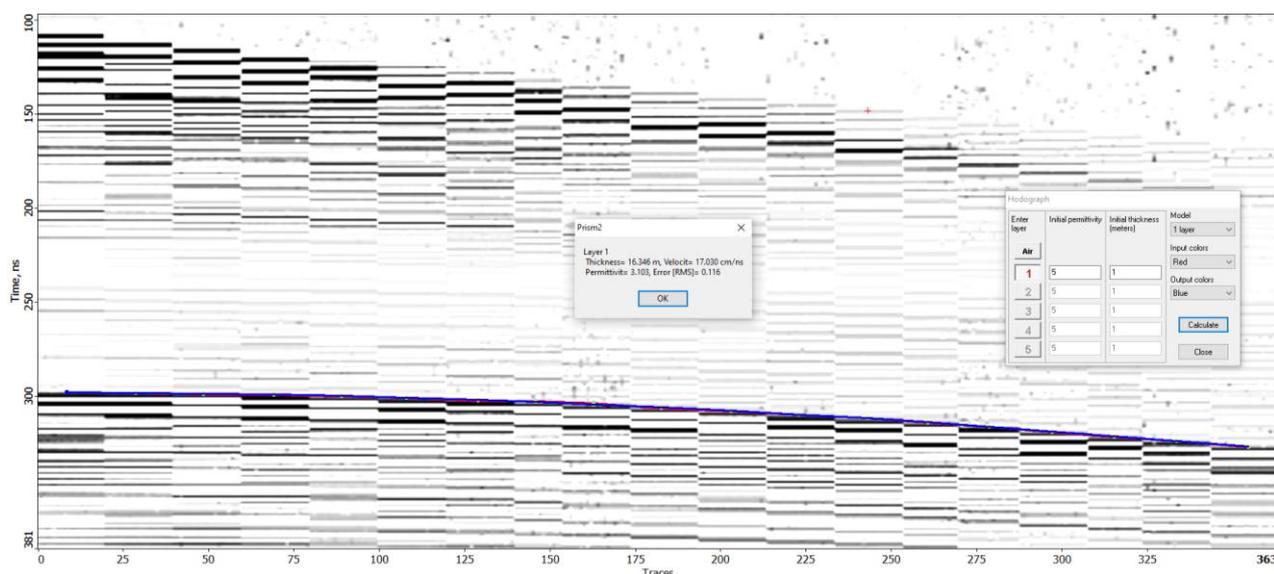


Рисунок 17. Окно программы после вычисления методом ОГТ на леднике в Антарктиде.

Полученные значения подтвердили, что этот слой является льдом. Рассчитанная диэлектрическая проницаемость равна 3,1, что соответствует априорным данным (рисунок 18).

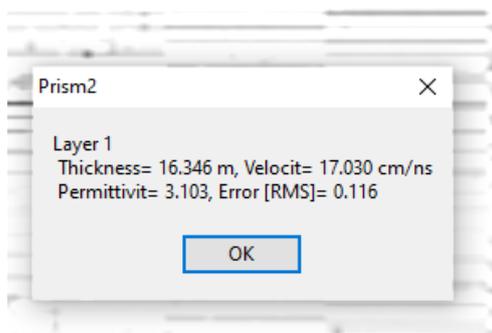


Рисунок 18. Полученные значения диэлектрической проницаемости и скорости распространения э/м волн в среде на леднике.

Третий способ - определение по данным бурения скважины или другой априорной информацией. В данном случае накладывается колонка, которая была пробурена, на профиль радарограммы. Зная мощности сред из керна и положение их границ на радарограмме можно наложить колонку или несколько колонок с известными толщами на ось X со значениями времени и совместить их. Благодаря этому будут известны глубины тех или иных сред (Владов и др., 2004).

2.4. Роль георадиолокации при исследовании ММП (на примере других объектов)

Георадиолокация используется для изучения верхней части разреза при глубинных съемках. При исследовании ММП георадиолокацию применяют как основной или вспомогательный метод. В отличие от других методов она дает возможность определять положение границ, структуру, физические свойства среды. Результаты многих исследований позволяют делать выводы, георадиолокация актуальная и эффективна при исследовании ММП (Судакова и др., 2018).

Изучение ММП важно при решении большинства задач инженерной геологии, при строительстве в районах сурового северного климата. Использовать метод георадиолокации в России стали впервые во времена СССР при исследовании ледников не на поверхности земли, а с самолета (Василенко и др., 2001). Последние годы георадиолокация при изучении ММП получила довольно широкое распространение. Помимо построения профилей для исследователей представляют большой интерес физические свойства ММП, в частности скорости распространения электромагнитных волн в среде. Когда температура горной породы переходит через нулевую отметку, происходят изменения в геофизических показателях сред: уменьшается проводимость, диэлектрическая проницаемость. Эти преобразования электрических свойств сред позволяют выделять границы воздуха, воды, различных грунтов и льда. Благодаря этому георадиолокация показывает успехи в изучении первых десятков метров разреза ММП. Традиционно главная задача георадиолокации при исследовании ММП - выявление границы мерзлых и немерзлых пород. Определение границы возможно благодаря разным значениям диэлектрической проницаемости у воды, воздуха, льда и других сред. При увеличении содержания в замерзшей воде льда уменьшается значение диэлектрической проницаемости и увеличиваются скорости распространения электромагнитных волн. Эти закономерности помогают выявить на радарограммах границы сред, что после позволит успешно

картировать толщи. Помимо картирования георадиолокация успешно проявляет себя при поиске локальных объектов, таких как мамонты, невыявленные бугры пучения, талики. Также метод планируется использовать не только на Земле, но и на Марсе при поиске замерзшей воды (Судакова и др., 2018).

Изучением криолитозоны при помощи метода георадиолокации занимались многие исследователи. Омеляненко А.В. (2001) в своем автореферате делает выводы, что метод крайне эффективен при детальном исследовании строения, мощностей ММП. Он позволяет проследить структуры массива ММП, выявить в нем нарушения, а также обнаружить линзы в курумах (Омеляненко, 2001).

В своей статье А.П. Ермаков и другие (2010) описывают изучение ММП в тундровом районе р. Южная Хыльчюю, которые были необходимы для проектирования и прокладки трассы трубопровода. Авторы отмечают, что физические особенности кровли ММП, в частности коэффициент отражения, позволяет выделить на радарограммах поля интенсивных кратных волн. При изучении этой местности также крайне эффективно метод георадиолокации показал себя при изучении бугров пучения, которые не были выявлены в виде форм рельефа на поверхности. На Рисунке 19 представлена радарограмма одного из таких бугров, который никак не показывает свое существование при наблюдениях на поверхности, однако очень явно выражен на радарограмме.

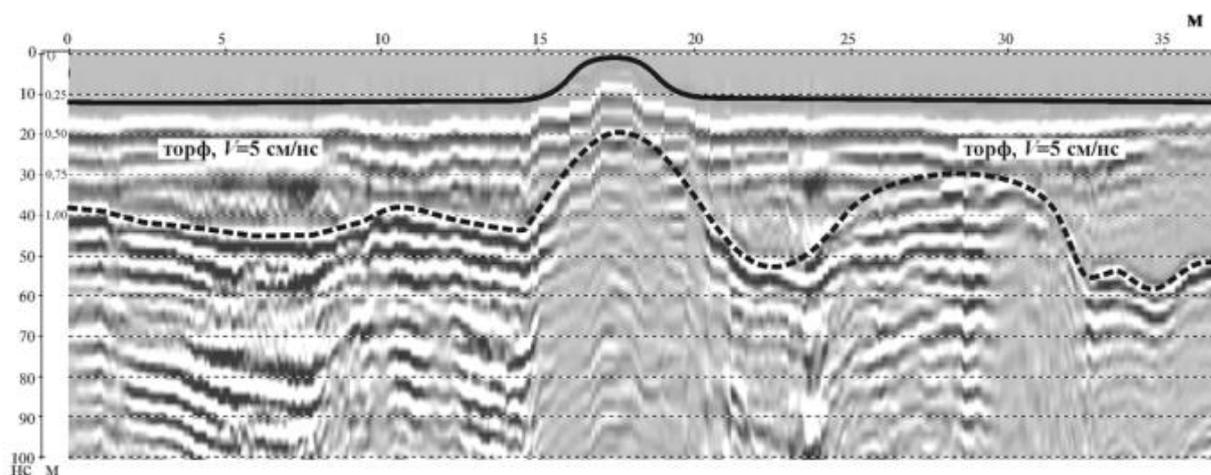


Рисунок 19. Невыраженный, только зарождающийся, бугор пучения на пикетах 25-30 (Ермаков и др., 2010).

Также авторы рассматривают в качестве объекта исследований ММП в засоленных почвах в районе порта Варандэй в Баренцевом море. Из-за близости моря почвы на нем очень засолены. На радарограмме на рисунке 2 авторы обращают внимание на пикеты 105–120 м, где происходит уменьшение амплитуд отражения волн, однако кровля ММП прослеживается. Это связано с растеплением ММП, однако обнаружение этого явления в скважине не представляется возможным, что делает георадарную съемку актуальной. Подводя итоги, авторы приходят к заключению, что при изучении ММП георадиолокацией метод эффективен так как позволяет выделить кровлю ММП в незасоленных грунтах, изучить ММП, которые находятся в растепленном состоянии, определить положения бугров пучения, которые никак не выражены в рельефе (Ермаков и др., 2010). В статье Судаковой М.С. (2019) описывается методика изучения торфяников в районах распространения ММП в Западной Сибири летом. Зондирование георадаром позволяет получить детальный геокриологический разрез, выявить границы кровли и подошвы, получить данные о физических свойствах изучаемых грунтов. Однако авторы считают, что более эффективным методом будет в зимнее время, когда породы менее насыщены водой, потому что торф не позволяет получать данные о ММП, которые залегают ниже (Судакова и др., 2019).

Эти примеры применения метода георадиолокации при изучении ММП показывают эффективность метода при изучении в тех или иных условиях.

Глава 3. Характеристика Тункинской котловины

Тункинская котловина — впадина байкальского типа в горах Восточных Саян в Байкальской рифтовой зоне. Физико-географическое положение долины сделало своеобразным ее рельеф, климат, воды, почвенный покров. Входит в Тункинскую систему, которая включает Быстинскую, Торскую, Тункинскую, Туранскую, Хойтогорьскую и Мондинскую рифтовые впадины, которые обрамляются частями хребтов Тункинские гольцы и Хамар-Дабан (Ангахаева, Н.А., 2021). На рисунке 19 показано положение котловины относительно других объектов.

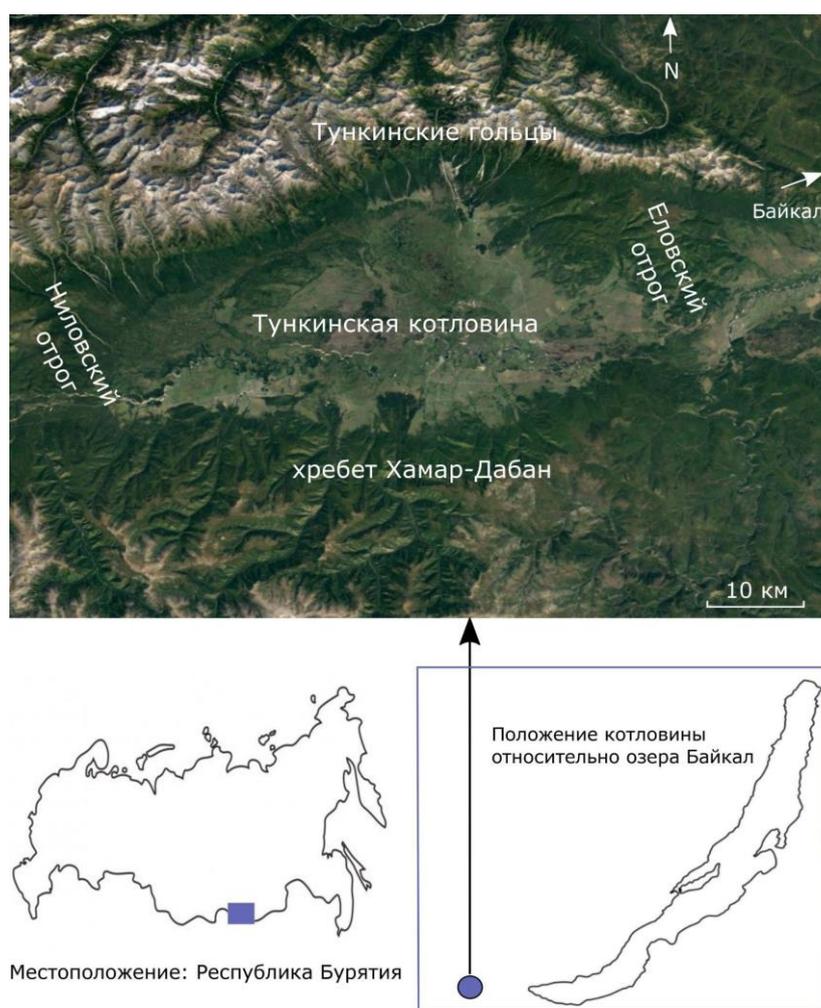


Рисунок 20. Схема расположения Тункинской котловины в Республике Бурятия.

3.1. Климат

Зимой над Восточной Сибирью господствует Сибирский антициклон. Континентальный воздух имеет исключительную вертикальную устойчивость и малое влагосодержание. Весной антициклон ослабевает за счет прогрева поверхности. Разрушение области высокого давления к концу весны сопровождается восстановлением зональной циркуляции. Прибайкалье является естественной границей распространения муссонов, свойственных юго-восточной окраине Евразии. Муссоны проявляются в июле-августе. Осенью в результате радиационного выхолаживания интенсивность западного переноса возрастает. Потоки холодного воздуха заходят с северного направления и вызывают понижение температуры и усиление ветров (Генезис почв..., 1983).

С процессами циркуляции атмосферы тесно связан влагооборот. В Расчлененность рельефа напрямую влияет на неравномерность увлажнения воздуха Прибайкалья. Воздушные массы, встречая на пути горные хребты, запруживаются. Предгорная зона запруживания обнаруживается на больших расстояниях. После достижения воздушными потоками водораздельной линии хребтов, охлажденный воздух опускается, адиабатически расширяется и удаляется от состояния насыщения, в результате чего наветренные склоны хребтов, осевые линии которых пересекаются с направлениями господствующих течений, характеризуются значительно большей влажностью и облачностью по сравнению с подветренными. Это ухудшает радиационный режим, что в совокупности с высоким уровнем увлажнения опускают здесь снеговую линию (Генезис почв..., 1983).

Также рельеф влияет на изменение радиационного баланса в зависимости от абсолютной высоты, уклона и экспозиции поверхности. Увеличение абсолютной высоты сопровождается уменьшением мутности и плотности атмосферы, что обуславливает иной радиационный баланс гор по сравнению с низинами. На формирование климата территории большое влияние оказывает экспозиция склона (Ливеровский и др., 1960).

Интенсивное летнее нагревание становится причиной локальной циркуляции. Днем прогретый воздух поднимается по склонам, ночью холодный воздух опускается обратно и заполняет котловину. Это приводит к большим амplitудам суточного хода температуры и, как следствие, к появлению ветров “бризов” между соседними котловинами. Заметен градиент температур и осадков на периферии котловины и в ее центральной части (Картушин, 1969).

Суточные и годовые амplitуды колебания температуры воздуха очень велики. Средняя температура января в котловине равна -23°C , июля - $+17^{\circ}\text{C}$, при продвижении в горы амplitуда колебания температур уменьшается. Среднегодовая температура воздуха за многолетний период наблюдений понижается до $-6,6^{\circ}\text{C}$ (верховье Иркуты) и $-3,1^{\circ}\text{C}$ (Тункинская впадина). Минимальная суточная температура достигает -50°C (январь) максимальная $+39^{\circ}\text{C}$ (июль). Осадков выпадает от 276 мм/год на равнине, до 1000мм/год в гористой местности, что существенно превышает средний показатель по региону (230 мм/год) (Ресурсы поверхностных..., 1966).

Зима с отрицательными средними суточными температурами начинается в середине ноября и длится около семи месяцев. Мощность снежного покрова мала, основная масса осадков выпадает летом, на зимние месяцы приходится всего 30-35 мм (Василенко и др., 2015). Степень континентальности в Тунке составляет 82 %. Сильно развита зимняя инверсия температуры. Разность годовых сумм отрицательных и положительных температур колеблется от -515°C в пос. Аршан до -1331°C в с. Кырен (Картушин, 1969).

Наибольшее количество осадков выпадает в краевой части Тункинской котловины на границе с Тункинскими гольцами (511 мм/год), в центральной части котловины, по данным метеостанции Тунка, среднегодовое количество осадков составляет 365 мм (Выркин и др., 1991). Внутригодовое распределение осадков очень неравномерно. За апрель-октябрь выпадает 95,6 % годовой суммы, а на долю ноября-марта на осадки в твердом виде приходится лишь 4,4 %. Концентрация осадков в теплый период (в июне –

августе выпадает до 72 % годовой нормы) сопровождается большими суточными выпадениями осадков, намного превышающими 50 мм (Картушин, 1969.)

3.2. Геологическое строение

Со второй половины плиоцена в Прибайкалье устанавливается рифтовый режим, который продолжается по настоящее время (Кайнозой..., 2001). Байкальская рифтовая система - глубинный разлом земной коры, окаймляющий южную и юго-восточную границы Сибирской платформы. Ее составляют 11 крупных кайнозойских впадин. Хубсугульская и Байкальская впадины рифта заполнены водами одноименных озер (Кайнозойский..., 2010). Формирование отдельных рифтовых бассейнов в позднем кайнозое происходило как на северо-восточной, так и на юго-западной частях Байкальской рифтовой зоны. Тункинская рифтовая долина примыкает к Южно-Байкальской впадине на западе и представляет собой шесть впадин (с востока на запад): Быстринская, Торская, Тункинская, Туранская, Хойтогольская и Мондинская. Впадины отделены друг от друга перемычками-поднятиями. Тункинская долина ограничена с севера крутыми склонами Тункинских гольцов, а с юга – пологим склоном хребта Хамар-Дабан. В центре долины располагается самая крупная (65×32 км) Тункинская впадина глубиной более 2500 м (Рифтовые впадины..., 2009).

Тункинская долина состоит из метаморфических пород докембрия, которые прорывают интрузии архейского и протерозойского периодов. В долинах рек эти породы перекрываются рыхлыми породами кайнозойского периода (Сейсмогеология..., 1981).

Докайнозойский фундамент. В Южном Прибайкалье самыми древними породами считаются нижнеархейские породы шарыжалгайской серии, слагающие фундамент южной окраины Сибирской платформы. Общая мощность этой серии превышает 5500 метров. Для серии характерны процессы

мигматизации и гранитизации, а также глубокого метаморфизма (Государственная геологическая..., 2009).

Большую роль в строении Западного Хамар-Дабана и Тункинских Гольцов играют также породы венд-палеозойского возраста. В Западном Хамар-Дабане они состоят из полимиктовых песчаников, карбонатных сланцев и известняков. Мезозойские отложения в Юго-Западном Прибайкалье встречаются только в Тункинских Гольцах на водоразделе рек Шумак и Билюта. Они представлены песчаниками, конгломератами и алевролитами, которые переслаиваются углистыми сланцами (Лопатин, 1972). Интрузии в Южном Прибайкалье датируются археем-нижним протерозоем. Интрузии прорывают породы шарыжалгайской серии и представлены зачастую гранитами и гранодиоритами (Выркин, 1998).

Кайнозойский осадочно-вулканогенный комплекс. Отложений мела и палеогена в Тункинской долине нет, потому что в это время были крайне активны процессы выветривания. Кора выветривания была до 25 метров, а увидеть ее можно в погребенных частях впадин, либо в некоторых местах хр. Хамар-Дабан (Выркин, 1998).

Осадконакопление в кайнозое делят на два этапа: раннеорогенный и новобайкальский (орогенный), для каждого из которых характерны свои климат и тектоника. Раннеорогенный этап проходил в верхнем олигоцене-нижнем плиоцене, тектоническая активность была слабой, а климат теплый, что приводило накоплению мелкообломочных молассоидов. Эти осадки Н.А. Логачев (1958) выделил в угленосную свиту. Ранее считалось, что низы свиты имеют возраст миоцен. И лишь в последние годы удалось получить надежное обоснование этого предположения и "опустить" низы угленосной свиты до верхнего олигоцена (Щетников и др., 2004).

Полный разрез кайнозойских отложений был получен впервые в 1987 г. у пос. Жемчуг в результате бурения скважины. Из проб, отобранных в нижней части угленосной свиты, сложенной глинами, аргиллитами, песками, известняками и бурыми углями, в интервале 1050-880 м были выделены

богатые палинологические спектры, характерные для олигоценых отложений Прибайкалья (Щетников и др., 2004).

Второй этап, новобайкальский, проходил уже при сильных тектонических движениях, холодном климате, что повлияло на процессы осадконакопления (Равский, 1972). Отложения верхнего плиоцена составляют охристую свиту, она отличается от угленосной свиты резкой сменой грансостава осадков. Охристая свита имеет максимальные мощности в центральной части Максимальной мощности (до 500 м) охристая свита достигает в центральной части Тункинской котловины (Государственная геологическая карта..., 2009). Ведущая роль в составе свиты принадлежит чередующимся грубообломочным конгломератам, брекчиям, гравийным и грубозернистым пескам и песчаникам. И лишь во внутренних полях наиболее крупных впадин эти отложения замещаются мелкозернистыми песками, алевритами и даже глинами. Для этих осадков характерно интенсивное ожелезнение (Щетников и др., 2004).

На охристой свите согласно залегает туфогенно-осадочная свита мощностью до 350 м, которая так же, как и нижележащая, выходит на дневную поверхность в Еловском отроге. В Тункинской впадине ее слагают переслаивающиеся базальтовые туфы, туффиты и туфогенные песчаники. Осадки этой свиты содержат спорово-пыльцевые комплексы, главным образом хвойных растений – сосны, ели, лиственницы и пихты (Щетников и др., 2004).

Четвертичные отложения Тункинской котловины можно сгруппировать в три комплекса: валунно-галечный, песчаный и покровный лессовидный. Валунные галечники находятся по краям впадины в конусах выноса рек с хребтов, слагают моренные отложения оледенений и флювиогляциальные образования (Щетников и др., 2004).

Пески занимают большую часть Тункинской впадины, а также северные склоны хребта Хамар-Дабан. Также полностью песками сложена куполообразная возвышенность Бадар в центре Тункинской котловины.

Изученная мощность песчаных отложений массива составляет 500 м. Грансостав и минералогический состав этих довольно прост: несортированные и разнозернистые, но иногда встречается сортировка. Часто встречаются линзы мелкого галечника, гравия и торфа. Глинистые прослои отсутствуют. Пески имеют желто-серую однородную окраску. Плейстоценовые пески содержат в себе минералы, которые легко выветриваются, такие как эпидот, слюды, полевые шпаты. Слоистость у песков параллельная (Щетников и др., 2004).

В Тункинской котловине накопление обломочных палеоген-четвертичных толщ происходило при участии вулканизма. Сначала происходило излияние лавовых потоков во время формирования угленосной свиты. Доля вулканогенной толщи первой фазы среди других кайнозойских базальтов занимает около 70%. Они представляют собой темно-серые и черные, мелкокристаллические, нередко пористые породы с офитовой структурой и состоят из минералов оливинового ряда и вулканического стекла (5-7%). Мощность этих толщ достигает 400 м. При этом найти их можно как в отложениях впадин, так и среди горных вершин хребтов. В позднем плиоцене - раннем плейстоцене вулканизм происходил в виде эксплозий (Выркин, 1998).

Предголоценовое время характеризуется также вулканической активностью. Происходили излияния небольших объемов лавовых потоков и образовании вулканических конусов из шлака высотой до сотни метров. В настоящее время на территории котловины известных такие вулканы, как Хурай-Хобок и Тальские, которые были образованы в предголоценовое время. Верхнетвертичные базальты заполняют отрицательные формы рельефа, такие как днища долин, имея вид лавовых потоков. Их мощности могут достигать 200 метров, в их составе преобладают оливин, авгит, стекло, плагиоклаз, причем на стеклянные массы отводится до 70% от состава (Щетников и др., 2004).

К голоценовым отложениям относятся аллювий пойм, торфяники современных болот, современные эоловые отложения. Мощность

голоценовых пойменных отложения в целом небольшая, но в местах сильных опусканий может достигать нескольких десятков метров. В центральной части Тункинской котловины широко развиты озерно-болотные отложения: илы, глины, торфяники (Равский, 1972). Осадконакопление материала в настоящее время в котловине характеризуется сужением области постплейстоценового накопления, что в свою очередь отражено в опускании центральной части котловины и возвышении ее окраин. Важно упомянуть, что исследуемая территория по сей день испытывает влияние землетрясений. Их интенсивность оценивается в 7-11 баллов, а их деятельность влияет на современный рельеф (Выркин, 1998).

3.3. Геоморфологические особенности

Н.А. Логачев (1974) выделяет в строении ложа котловины следующие элементы: предгорные наклонные равнины, аллювиальная равнина, озерно-болотная низина зоны новейшего погружения, песчаные массивы-увалы, межвпадинные горные перемычки, вулканические конусы, котловины выдувания (рисунок 21).

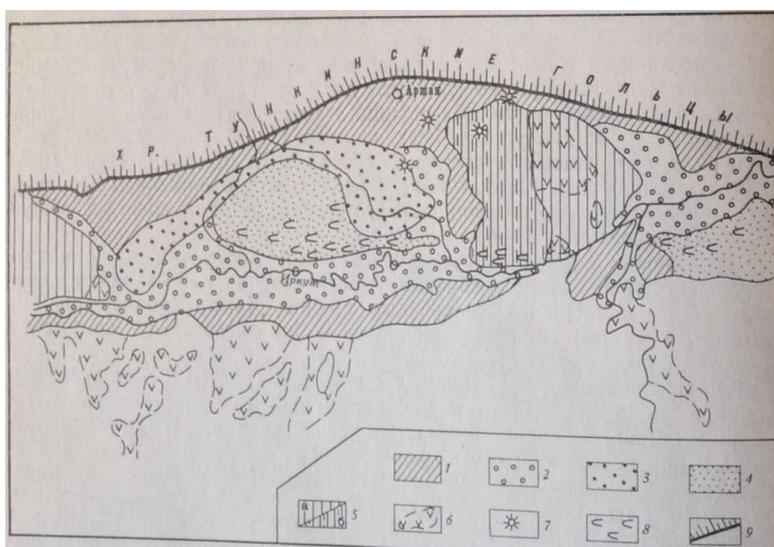


Рисунок 21. Главные морфологические элементы Тункинской котловины (Логачев, 1974).
Условные обозначения: 1 – предгорная наклонная равнина; 2 – аллювиальная равнина; 3 – озерно-болотная низина зоны новейшего погружения; 4 – песчаные массивы и увалы; 5 –

межвпадинные горные перемычки (а – сложены докембрием; б – сложены комплексом неоген-четвертичных пород); 6 – фрагменты базальтовых плато; 7 – вулканические конусы; 8 – котловины выдувания; 9 – сбросовый фас Тункинских Гольцов.

На исследуемой территории встречается ряд форм рельефа, делающих облик Тункинской котловины уникальным. К ним относятся ледниковые образования, криогенные формы рельефа, такие как термокарст, солифлюкционные образования, бугры пучения. Также примечательны вулканические конусы выноса и эоловые формы рельефа (Логачев, 1974).

Примерно 30% от площади котловины подвергается эоловым процессам, которые преобразуют рельеф, ландшафты. Эти территории находятся на правом берегу р.Тунки, на востоке от массива Бадар. Именно этот массив играет важную роль в формировании рельефа котловины. Он был образован в результате вырубки лесов в 18 веке. Северная часть массива переходит в низинные образования, а южная оканчивается обрывом метров 60-70, который размывается рекой Иркут. На востоке массив переходит в узкую валообразную возвышенность, которая разделяет низинную озерно-болотную часть котловины от поймы р. Иркут (Логачев, 1974). Значительные площади эолового рельефа свидетельствуют о существенной роли ветра в формировании рельефа, отложений и ландшафтов в течение позднего плейстоцена и голоцена Тункинской котловины (Белозерцева и др., 2013).

3.4. Гидрография

Речная сеть района исследования характеризуется густотой. По Тункинской котловине протекает крупная река Иркут, являющаяся основной водной артерией местности. Длина ее русла составляет 467 км. Исток реки находится в Саянах у горных рек – Белого, Среднего и Черного Иркуты. Общая площадь бассейна равна 15,6 тыс. км². Почти на всем протяжении Иркут представляет собой бурную горную реку (Иркут, 1969-1978).

Также примечательна река Кынгарга, которая берет начало с южных склонов хр. Тункинские Гольцы. Общая длина реки равна 26 км. Река теряет сток в наносах, когда выходит на котловину с гор, но при этом все равно имеет ярко выраженное русло с большим объемом р. Тунки, впадая в нее. В верхнем течении русло реки гладко отполированным водой розовато-желтым архейским мрамором (рисунок 22). Река на своем пути образует ряд перекатов и два исключительно красивых водопада свободного падения, один – высотой 6 м, другой – с более широким падением воды и высотой 5 м.



Рисунок 22. Мраморное дно реки Кынгарга (Мраморное дно р. Кынгырга...[Электронный ресурс], дата обращения 23.02.2022)

Величина среднего годового расхода воды составляет 0,8 м³/сек. Основная доля годового стока проходит в теплый период. Основными левобережными притоками р. Кынгарга являются реки Мал. Харимта, Харимта, Улямхай. К западу от долины р. Кынгарга текут небольшие речки (реки Бухайка, Бугутой, Толта, Хандагайка), которые во время меженного сезона текут только в горной части, а на предгорьях иссякают. Если год выдается дождливым и снежным, эти реки могут выносить материал с гор на предгорья, становясь селевыми потоками. Лишь в годы обильными осадками, в периоды паводков они вытекают в предгорье селевыми потоками (Ресурсы поверхностных..., 1965).

Большое распространение на исследуемой территории имеют озера. Крупными озерными системами являются Койморская и Енгаргинская. Под

общим названием Койморские озера известно место многочисленных мелких озерков вблизи сел Тагархай и Толтой. Эти озера занимают небольшую площадь и связаны между собой протоками. Они являются озеровидным расширением русла р. Тунки, в которых течение почти незаметное, поток теряется в болотистой низине. Енгаргинская система тоже состоит из нескольких озёр, самое большое из которых – Енгарга. Все эти озера гетерогенны по происхождению и образовались в результате скопления грунтовых, снеговых и дождевых вод, стекающих с гор Тункинского хребта. Глубина озер колеблется от 0,7 до 1,8 м (Тункинский национальный парк... [Электронный ресурс] Дата обращения 23.02.2022).

3.5. Хозяйственная деятельность

Для территории Тункинской котловины характерна деградация сельскохозяйственных земель. За последние 20 лет площадь пашен в Республике Бурятия сократилась более чем в два раза. Забрасывание земель из сельскохозяйственной жизни привело к тому, что на их площадях стали развиваться процессы восстановления преобразованных компонентов, в частности биотических (Атутова и др., 2019).

Естественные ландшафты котловины стали изменяться, когда люди занялись на ее территории земледелием и заготовкой леса в начале 18 века. Впоследствии территории лесов при земледелии обрабатывались подсечно-огневым методом до начала 20 века. Этот способ земледелия отличался эффективностью и экологичностью. К началу 20 века большая часть территории котловины использовалась под пашни, при этом на северо-западе котловины сохранялись лесные массивы. Во время освоения целины в 50-х годах прошлого века в Бурятии увеличение пахотных земель происходило за счет сокращения площадей по всем другим видам сельхозугодий (сенокосам, пастбищам, выгонам). Из-за того, что при распашке склоновых территорий не учитывали особенности почв, это приводило к развитию эрозионных процессов и выклиниванию гумусового горизонта в почвах. В колхозах на

территории котловины по причине деградации почв в этот период было заброшено около 90 % пашни относительно площади впервые освоенных земель (Белозерцева и др., 2013).

В настоящее время большая часть пашен заброшена и используется для выпаса скота. Заброшенные пахотные угодья активно зарастают березой, сосной и лиственницей. Крупный рогатый скот является основной долей в поголовье скота при выпасе. Большая часть территории котловины имеет слабую и среднюю степени деградации земель. Это связано с тем, что на территории котловины нет крупных центров промышленного производства, а сельское хозяйство при этом не играет первостепенную роль. При этом важно сказать, что почвы Тункинской котловины чувствительны к воздействию человека из-за небольшой мощности и легкого грансостава (Белозерцева и др., 2013).

Распашка малых по мощности почв приводит к уменьшению разнообразия почв, ухудшению структурного состояния, снижению содержания в почве кислорода и углерода. Если на участке прекращается распашка, происходит формирование дернового горизонта в верхней части, однако нижняя часть агрогоризонта может сохранять свое состояние на срок 50-60 лет. При этом происходит зарастание заброшенного пахотного участка лесом и формирования лесной подстилки, восстанавливается гумусное состояние почвы, стабилизируются химические и физические свойства органического вещества. Первостепенный вид такие заброшенные участки могут приобрести лишь спустя 100-150 лет после забрасывания, их характеристики при этом становятся близки к естественным (Черкашина и др., 2015).

В настоящее время происходит сокращение площадей пашен, на их местах образуются залежи - участки, на которых ранее были сельхозугодья, но после они были заброшены. На них начинают преобладать восстановительные процессы сукцессии. В 1991 году на территории котловины был образован Тункинский Национальный парк, благодаря этому на его территории, а это

подавляющая часть котловин, запрещена разработка земель, строительство крупных промышленных заводов, мелиорация земель, промышленная заготовка и переработка леса. Сейчас на территории котловины есть небольшой цех по розливу минеральной воды в Аршане, два цеха по производству кирпича и переработке молока в Тунке. Создание парка можно считать довольно значимым событием, поскольку это позволило сохранить существующие ландшафты, а также дало возможность уже разрушенным восстановиться. Также благодаря этому на территории парка начались активные комплексные исследования всех природных комплексов, в том числе ММП, которые продолжают в настоящее время (Ахаржанова, 2004).

3.6. Мерзлота

В Байкальской горно-складчатой зоне, где находится исследуемая территория Тункинской котловины, выделяют три зоны: редкое островное распространение ММП, островное распространение ММП в низкогорной зоне, ММП с островами таликов в средне- и высокогорной зонах.

Область редких островов многолетнемерзлых грунтов приурочена к южным районам Восточной Сибири. Редкие острова и линзы многолетнемерзлых грунтов отмечаются в пониженных формах рельефа и на заболоченных участках долин рек, например, реки Иркут. Мощность мерзлых грунтов не превышает 5–10 м, редко достигает до 20 м, температура грунтов опускается до -0.2 °С. Область островного распространения многолетнемерзлых грунтов занимает большую часть юга Восточной Сибири – степные и таежные низкогорные участки, в том числе Тункинскую котловину. Мощность ММП тут достигает 30–50 м, на некоторых участках может превышать глубины до 100 м. (Геокриология СССР, 1989). Область многолетнемерзлых грунтов с островами таликов располагается в средне- и высокогорной зонах хребтов Хамар-Дабана и Байкальского (Некрасов и др., 1971). К району со сплошным распространением мерзлых грунтов относятся высокогорные районы. Мощность мерзлых грунтов достигает 150–200 м,

температура грунтов варьируется в пределах от -1.0 до -3.0 °С (Геокриология СССР, 1989).

Мощность и площадь ММП увеличивается по мере увеличения высоты местности и удалением от Байкала. В горах Южного Прибайкалья ММП островного типа распространены на северных склонах и на заболоченных участках в котловинах, долинах рек и озерах. Распространены многолетнемерзлые грунты в рыхлых глинистых отложениях. Мощность мерзлой толщи на таких участках достигает 50–100 м при среднегодовой температуре грунтов от -0.2 до -0.5 °С. В средне- и низкогорных областях, на абсолютных отметках менее 1000 м, в районе Байкальского хребта криолитозона имеет островной характер распространения и мощность до 60 м (Некрасов и др., 1971).

В Тункинской котловине мерзлые грунты редкоостровного типа встречаются в пределах болотных и озерных массивов, на перифериях песчаных массивов, а также на высоких террасах в виде островов мощностью 10–100 м и температурой до -0.5 °С. Островные ММП приурочены к центральной части. В Тункинской котловине выявлено двухъярусное строение ММП. Верхний ярус достигает мощности 100–200 м, носит островной характер, распространяется в поймах, низких надпойменных террасах. Нижний ярус - это реликтовая мерзлота позднеплейстоценового возраста, которая выявлена в толще песчаных массивов с глубинами от нескольких десятков до сотен метров (Замана, 1980).

3.7. Почвы

По схеме, предложенной Г.Ф. Копосовым (1983), исследуемая территория относится к Прибайкальской области, Хамар-Дабанской провинции, Тункинскому району с серыми лесными, мерзлотнолуговыми и аллювиально-луговыми почвами на суглинках, супесях и песках. Почвенный покров Тункинской котловины примечателен обильностью типов. Основу составляют дерново-подзолистые и серые метаморфические почвы, на

которых растут темнохвойные леса и сосняки. На серых почвах распространяются мелколиственные и смешанные леса. Основными почвами в высокогорье являются петроземы и литоземы. В горно-таежной зоне котловины на южных склонах формируются серые почвы, а на северных – подбуры грубогумусированные и дерново-подзолистые почвы. На северных склонах в относительно пониженных элементах рельефа формируются (торфяно-) криоземы и торфяно-подбуры глеевые, в которых происходят процессы криотурбации и оглеения. В степных ландшафтах распространены черноземы и темногумусовые почвы (Белозерцева и др., 2013).

На заболоченных территориях образуются р. Тунки образуются аллювиальные гумусовых глееватые почвы. Эта область погружается и приводит к озерных и болотных комплексов. Возвышенность Бадар, которая возвышается на 130–150 м над дном котловины имеет в почвенном покрове псаммоземы, дерново-элювоземы и слоисто-эоловых почвы с участками свободных песков (Белозерцева и др., 2013).

Глава 4. Результаты георадиолокации при исследовании ММП Тункинской котловины

Георадиолокация в Тункинской котловине проводилась на двух участках. Первый участок - залежь, второй - ельник, которые находятся друг от друга на расстоянии около 10 километров. Схема расположения обоих объектов представлена на рисунке 23. Весь болотно-озерный комплекс — зона современного опускания. На большей части территории верхняя часть разреза представлена торфом. Есть участки с открытым песком — останцы древних террас, представленные котловинами выдувания и аккумулятивными формами рельефа (дюны и гряды). Песчаные части опускаются значительно медленнее, чем заторфованные, за счет этого возникают участки с открытыми песками.

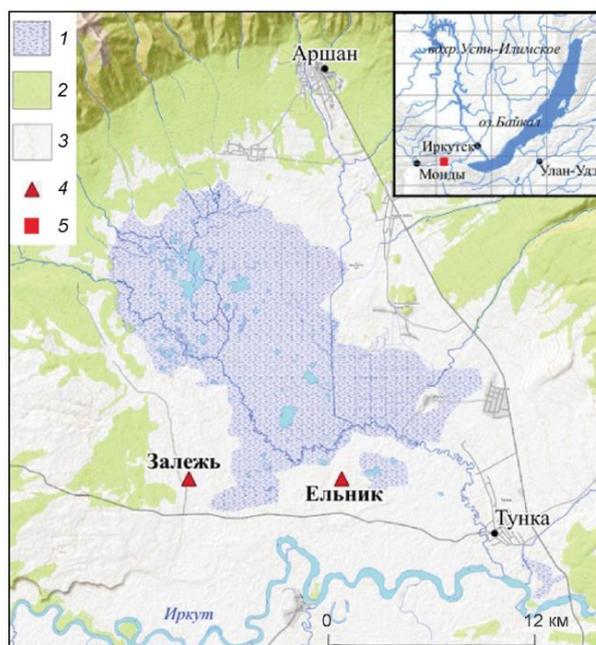


Рисунок 23. Схема расположения объектов исследования на территории Тункинской котловины (Воропай и др., 2019). Условные обозначения: 1 - болотно-озерный комплекс, 2 - леса, 3 - пашни, луга, 4 - объекты исследования.

Залежь - это участок заброшенных сельскохозяйственных угодий, в частности пашен. Участок не используется под нужды сельского хозяйства более 20 лет. Его можно считать сильно измененным из-за деятельности человека, при этом такие изменения не позволяют залежи восстановиться до естественного состояния. Растительность на нем представлена отдельными кустарниками и пыреем. На рисунке 24 представлена фотография, сделанная на участке залежи.



Рисунок 24. Фото залежи в Тункинской котловине (Воропай и др., 2019).

Объект “Ельник” представлен не трансформированным человеком еловым лесом, расположенном частично на болотной низине и эоловых песках. В лесной части объекта изолирующим слоем является подстилка из хвои, которая позволяет сохранять температуру нижележащих почв. Фото ельника представлено на рисунке 25.



Рисунок 25. Фото ельника (Воропай и др., 2019).

На обоих этих участках в период с 01.07.2013 г. по 30.06.2017 г. проводились температурные исследования (Воропай и др., 2019) по данным АПИК (атмосферно-почвенным измерительных комплексам), поэтому по обоим уже были некоторые данные о температуре грунтов и известно, как температуры почв изменяются по глубине в скважинах (рисунок 26). Это также позволяет увидеть глубины, на которых грунты становятся мерзлыми. Термометрия, как метод наблюдения за мерзлотой, позволяет собирать данные на временном срезе на конкретных скважинах, что дает возможность проследить за изменением температур, а следовательно и мерзлоты, в этих точках. Однако метод не позволяет увидеть изменения мерзлости грунтов на профиле или площади. Георадиолокация же дает возможность проследить за изменением кровли мерзлоты в площадном распространении.

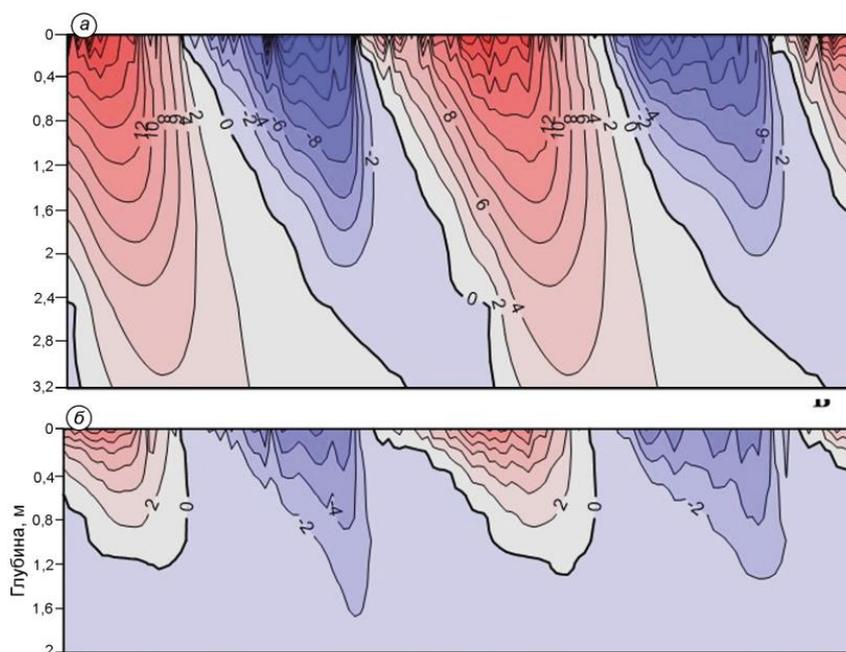


Рисунок 26. Средняя суточная температура почвы (а – залежь, б – ельник). (Воропай и др., 2019).

4.1. Объект «Залежь».

В конце 20 века участок пашни, который на протяжении века использовался под нужды сельского хозяйства, перешел в залежное состояние (Воропай и др., 2019). Антропогенное вмешательство стало причиной изменения в нем температурного режима грунтов, а также опусканию кровли многолетней мерзлоты. Деятельность человека на участке привела к тому, что древесная растительность, создающая экранирующий эффект, была сведена, а это, в свою очередь, изменило климатический режим грунтов на участке. Грунты на залежи быстрее и сильнее прогреваются, чем грунты и почвы на ельнике.

На залежи была выполнена съемка методом георадиолокации по системе профилей. Схема их расположения приведена на рисунке 27.

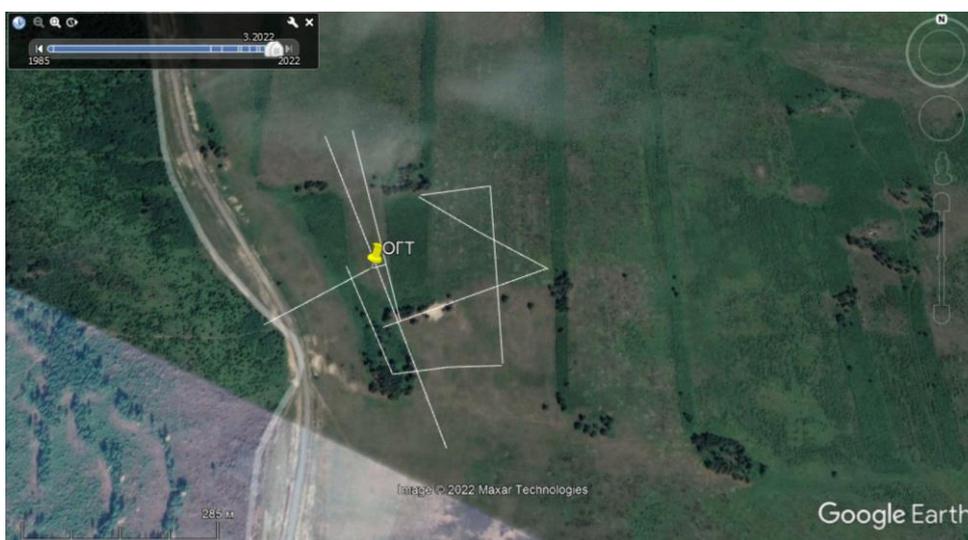


Рисунок 27. Схема расположения профилей на залежи.

Общая протяженность георадарной съемки на данном объекте составила около 2 км. Пример типичного временного разреза на залежи приведен на рисунке 28. На радарограмме выделяются три слоя (первый до 2,5 метров, второй до 5, третий - все, что ниже второго).

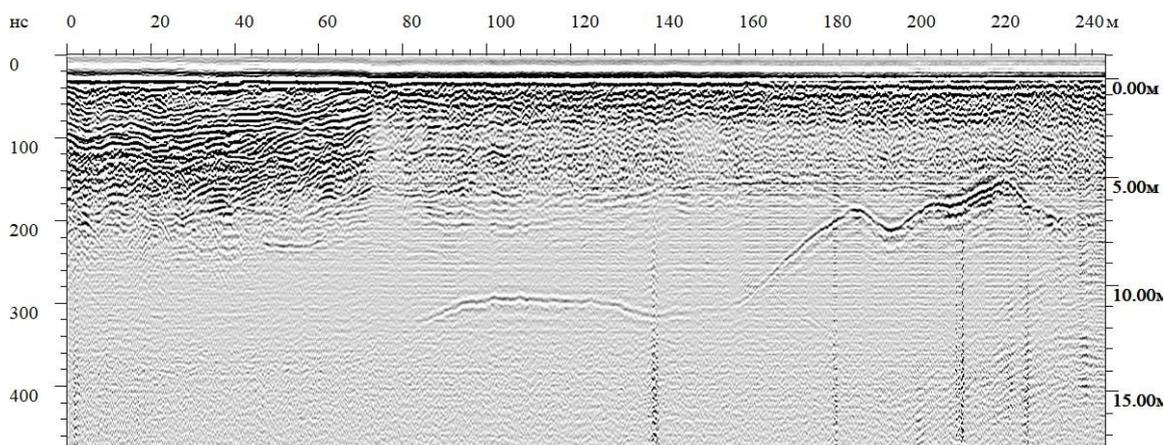


Рисунок 28. Пример типичной радарограммы, полученный на залежи (пр5).

На залежи была проведена также съемка методом общей глубинной точки (ОГТ). Точка на рисунке 27, обозначенная «ОГТ», соответствует положению месту проведения работ методом общей глубинной точки. В нескольких метрах от точки ОГТ располагается скважина с установленной системой АПИК. На рисунке 29 приведена радарограмма ОГТ на залежи.

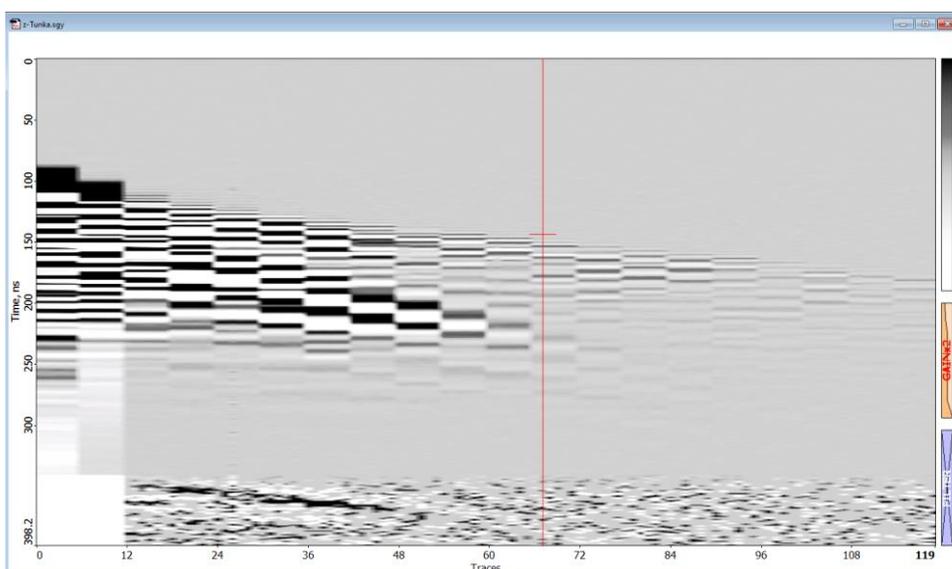


Рисунок 29. Радарограмма ОГТ на залежи.

Обработка годографа ОГТ показала, что диэлектрическая проницаемость первого слоя равна 6,5, второго - 23 (рисунок 30).

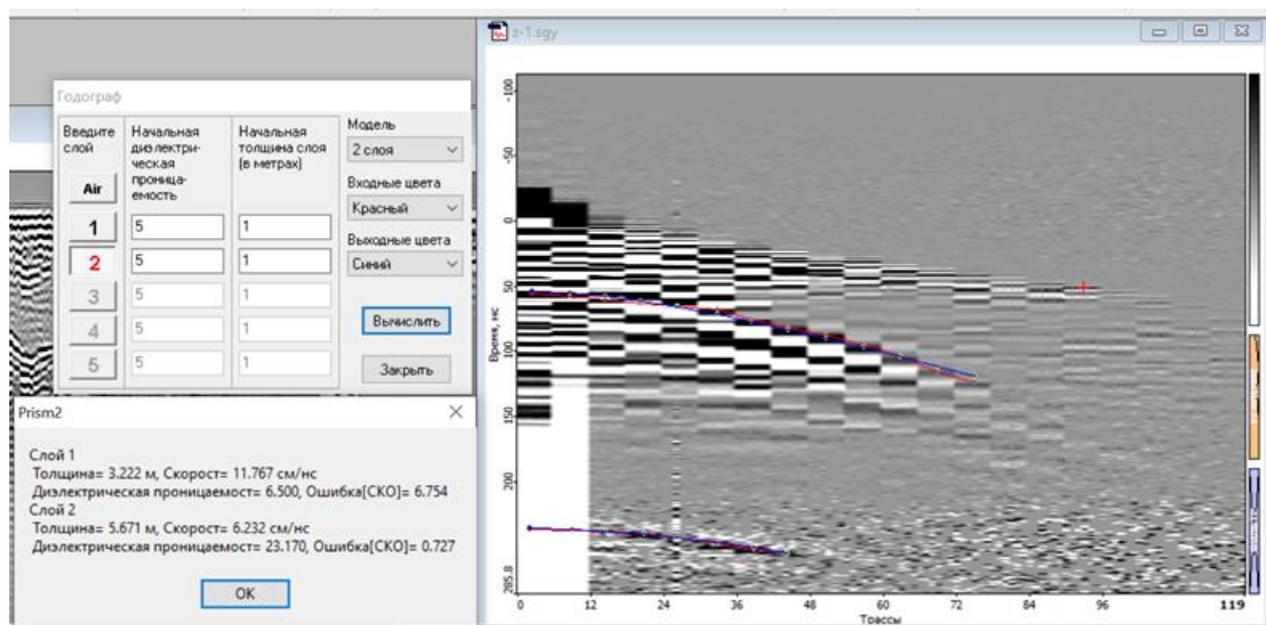


Рисунок 30. Окно обработки годографа ОГТ в Prism2.

Полученные данные о значениях диэлектрической проницаемости позволяют использовать их для создания глубинных разрезов по профилям, которые сделаны на участке. В месте проведения ОГТ находилась также скважина для мониторинга температур АПИК глубиной 2 м, однако она не

доставала до границы мерзлых грунтов. Первый слой по скважине был установлен как пески, по данным эpsilon - невлагонасыщенные пески. Второй слой - влагонасыщенные пески. Граница подошвы третьего слоя не была установлена, поэтому нельзя сказать, мерзлота это или нет. Однако если пробурить скважину для мониторинга температур в месте расположения кустов на профиле, то можно установить это, т.к. здесь граница подходит ближе к поверхности. На рисунке 31 показано визуальное расположение профилей на залежи, отмечено значение диэлектрической проницаемости, рассчитанной в Prism2.

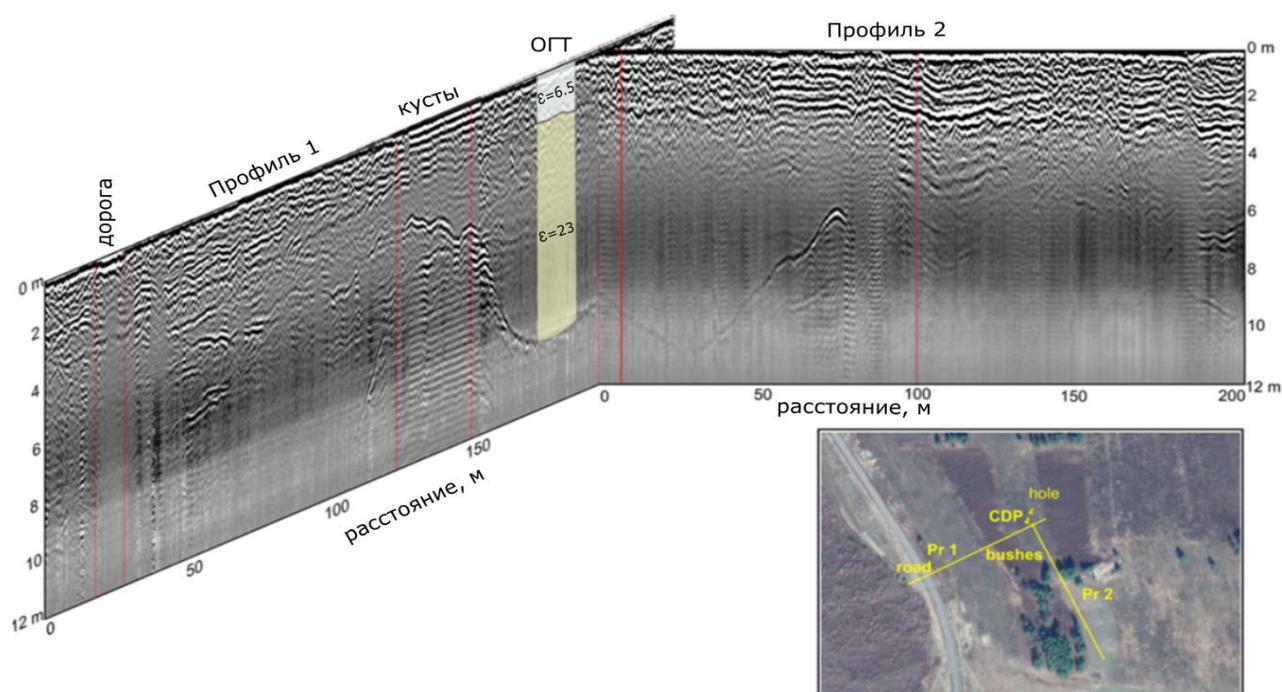


Рисунок 31. Схема расположения профилей относительно друг друга с отмеченными значениями диэлектрической проницаемости для слоев.

В качестве примера специфики обработки временных разрезов можно привести профиль 1 по залежи. Были отрегулированы усиления, контрастность, фильтрация, палитра на профилях, чтобы на них были различимы границы сред. На рисунке 32 показан вид разреза до обработки, на рисунке 33 после.

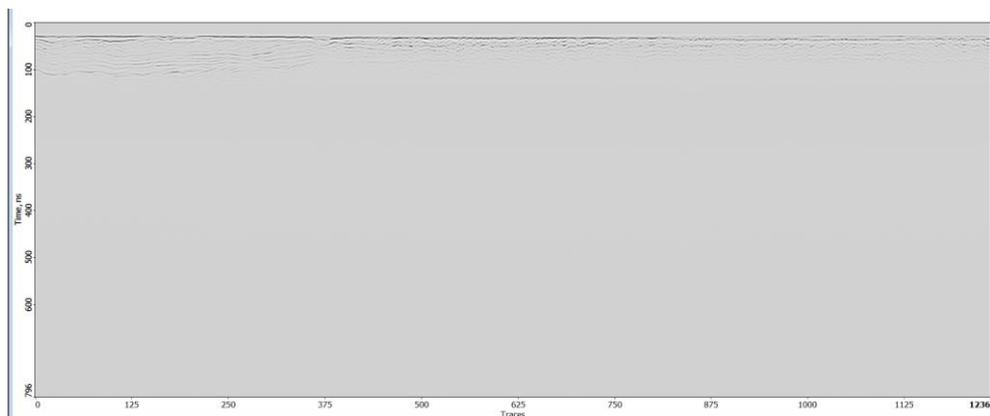


Рисунок 32. Необработанный временной разрез по профилю 1.

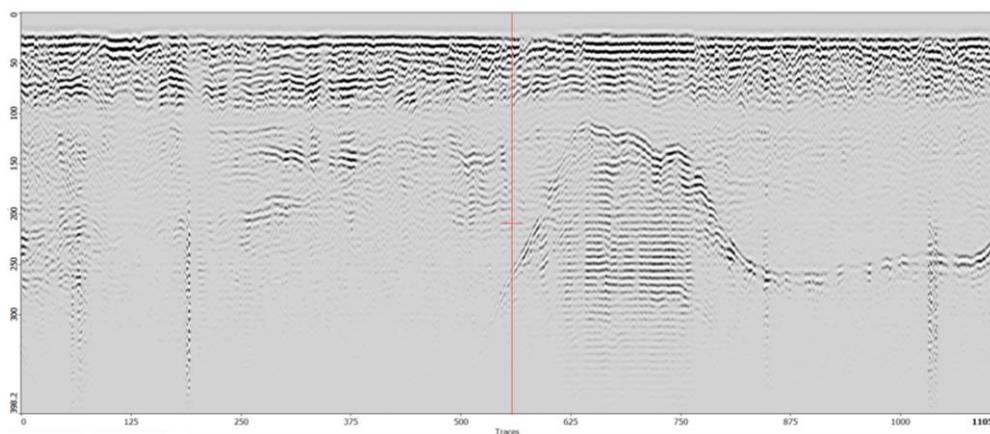


Рисунок 33. Разрез после его визуальных изменений в различных инструментах программы.

После этого в программе послойно были введены данные об диэлектрической проницаемости слоев на них.

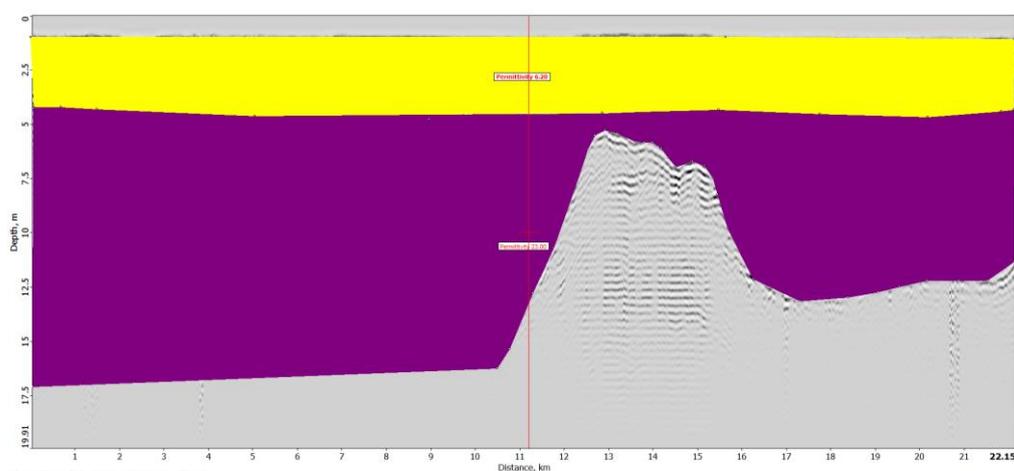


Рисунок 34. Временной разрез с введенными данными диэлектрической проницаемости для слоев.

Это позволило перевести временные разрезы в глубинные, используя функционал программы (рисунок 35).

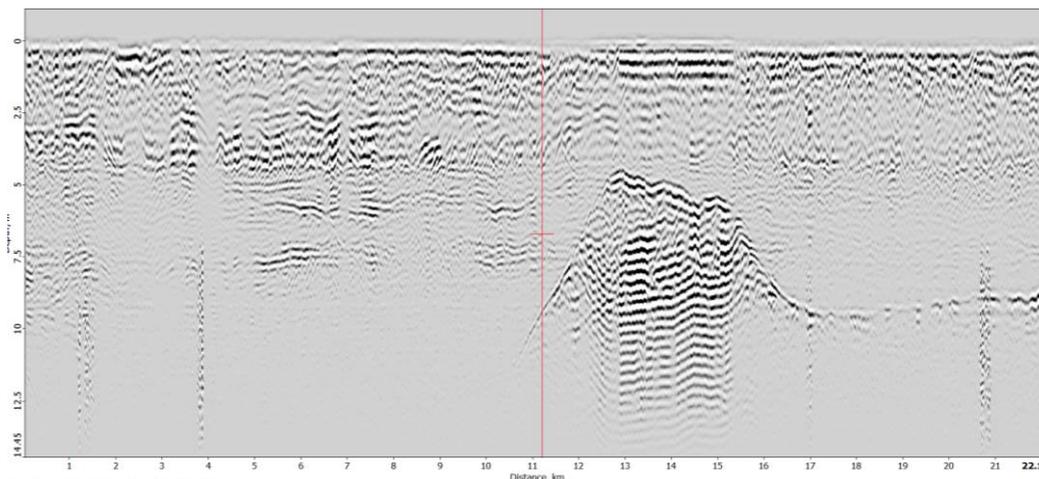


Рисунок 35. Глубинный разрез, полученный из временного.

После можно построить геолого-геофизические разрезы по априорным данным. В данном случае это информация из скважины, согласно которой первый слой являлся песком. Исходя из значений диэлектрической проницаемости, можно сказать, что первый слой - пески без воды, второй - насыщенные водой.

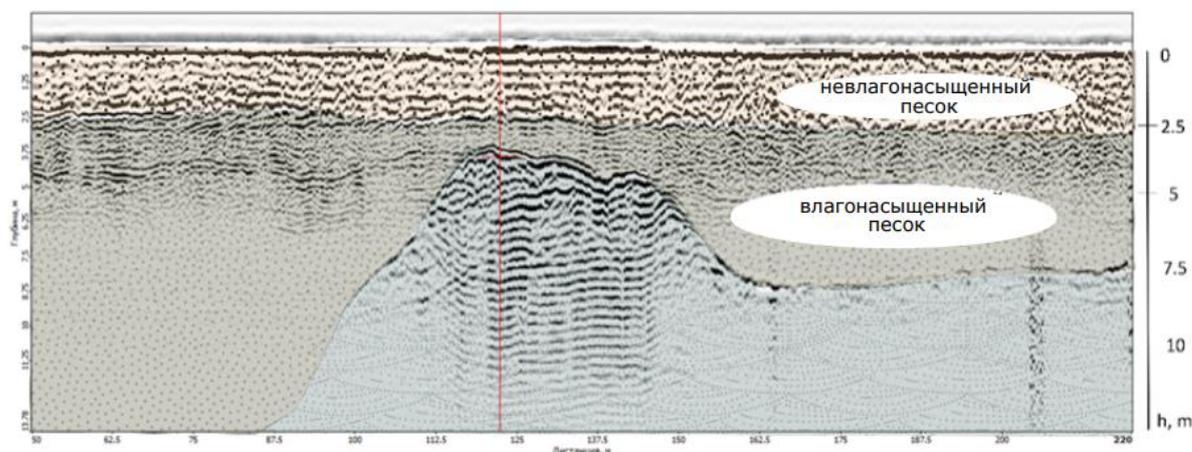


Рисунок 36. Геолого-геофизический разрез по профилю 1.

4.2. Объект «Ельник»

Георадиолокация на ельнике проводилась в двух местах: первый профиль проходил по низинному болоту, второй - по еловому лесу и эловым песчаным дюнам (рисунок 37). Данные АПИК в скважине показывают

глубины кровли мерзлоты от 100 до 130 см. Шурфы на площадке определяют кровлю мерзлоты от 70 до 100 см (рисунок 38).

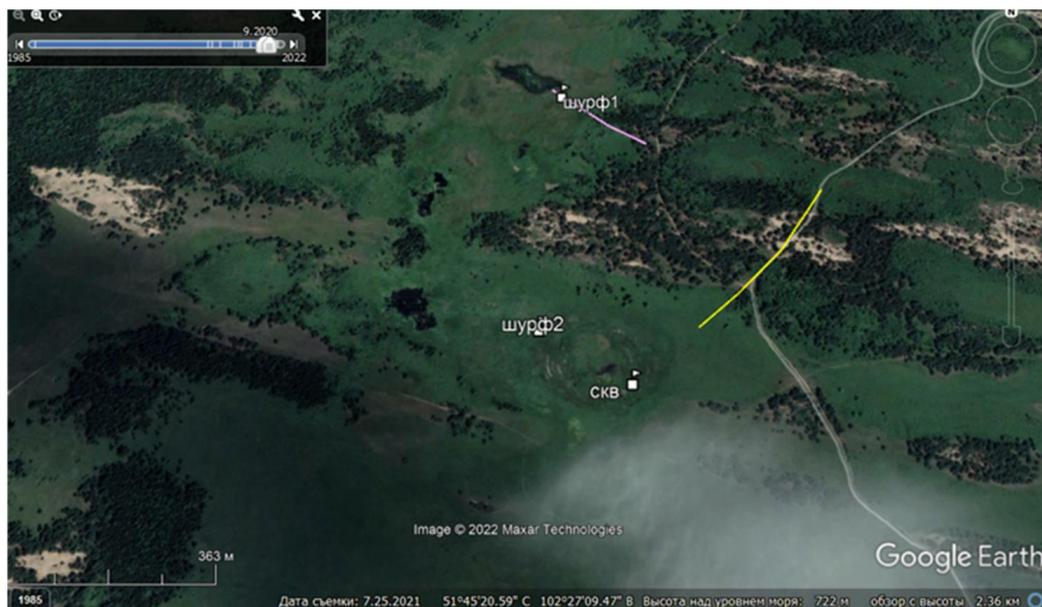


Рисунок 37. Профиля на объекте “Ельник”. Розовым цветом отмечен профиль на низинном болоте, а желтым - по ельнику.



Рисунок 38. Шурф на болотной части объекта “Ельник”. (Из личного архива М.П.Кашкевич).

Болотная часть. Профиль по болотной части проходил через низинное болото, в том числе по воде. На рисунке 39 приведен пример профиля по болоту.

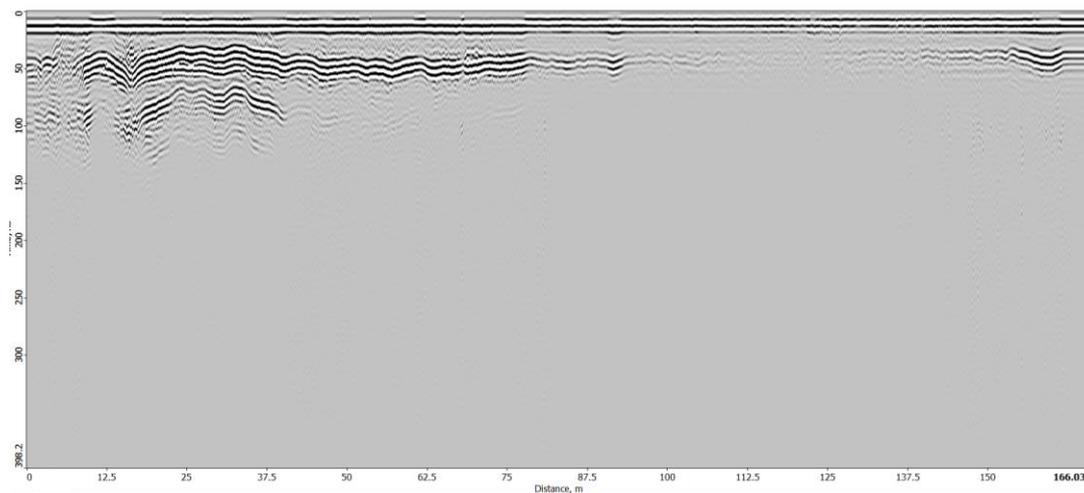


Рисунок 39. Временной разрез по профилю 17.

Болотная часть представляет собой низинное болото, являющееся частью Койморского водно-болотного комплекса. Койморские водно-болотные угодья характеризуются минеральными источниками подземных вод, которые влияют на растительный покров и, следовательно, на тип торфяных залежей. Появление солоноватой воды из источников довольно легко распознать из-за потери георадарного сигнала, это подтверждается измерениями электропроводности водоносного горизонта в ходе исследований, которые проводились в котловине (рисунок 40). Распределение минерализации грунтовых (болотных) вод вокруг болотного участка неравномерно. На кромке леса минерализация составляла 417 мг/л, между открытой водой болота и лесом на заболоченном участке, где теряется сигнал георадара, - 1056 мг/л. Ближе к болотной части минерализация составляет 206 мг/л, а на открытой воде болота – 150 мг/л. Это говорит о наличии выходов грунтовых вод, что влияет на довольно скорость торфонакопления — она увеличивается.

Определение сред на радарограммах для этого участка проводилось при помощи данных по шурфам, которые были выкопаны на нем. Они были соотнесены с полученными в ходе георадиолокации данными, что позволило перевести временные разрезы в глубинные.

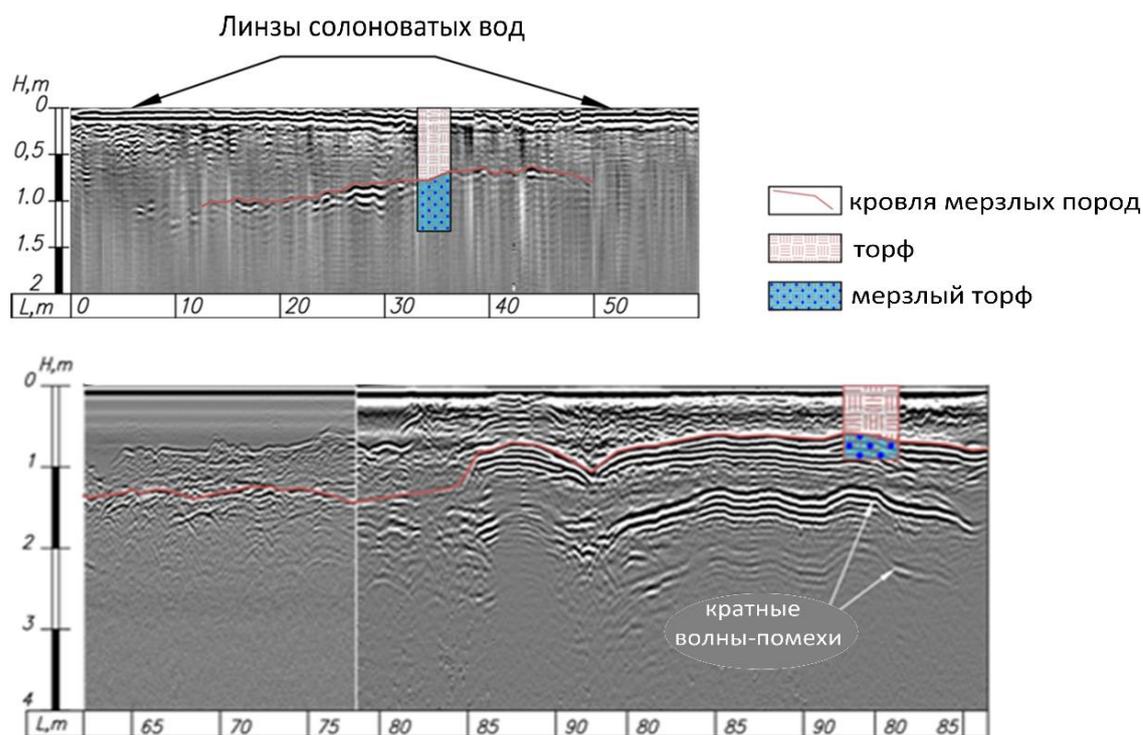


Рисунок 40. Схема разреза по болотной части.

На радарограмме четко видно границы кровли ММП за исключением мест поступления солоноватых вод. В них граница не определяется радаром из-за высокой степени их минерализации.

Лесная часть. На обработанном временном разрезе четко прослеживалась граница кровли ММП (рисунок 41).

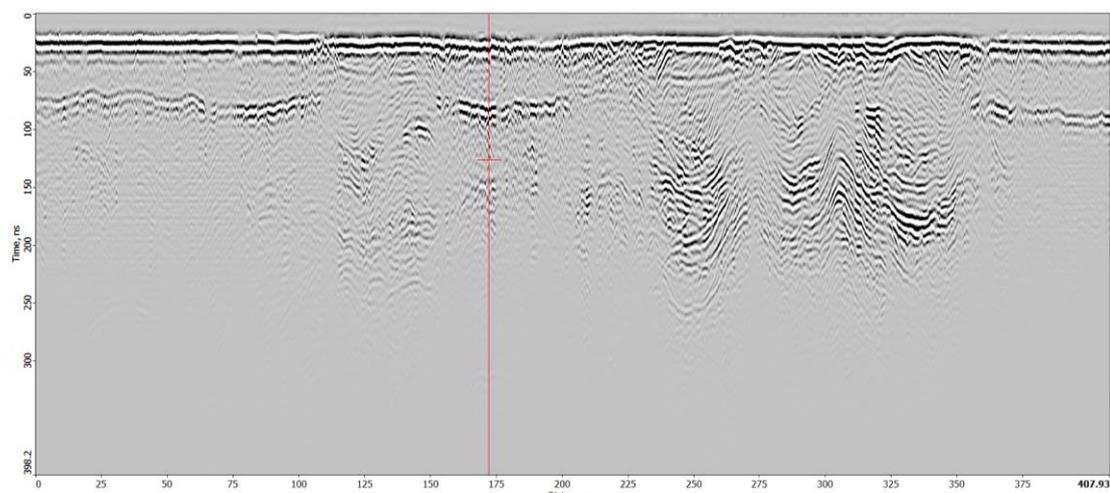


Рисунок 41. Временной разрез по профилю 25 на лесном участке объекта “Ельник”.

Граница кровли мерзлоты прослеживается по профилю везде, кроме мест с эоловыми песками (рисунок 42). Количество осадков в Бурятии, тем более в котловине невелико, а на открытых песках они фильтруются и уходят глубоко. Водоносный горизонт находится под этими песками ниже границы возможного промерзания. Соответственно, получаются сухоморозные толщи, не содержащие льда.

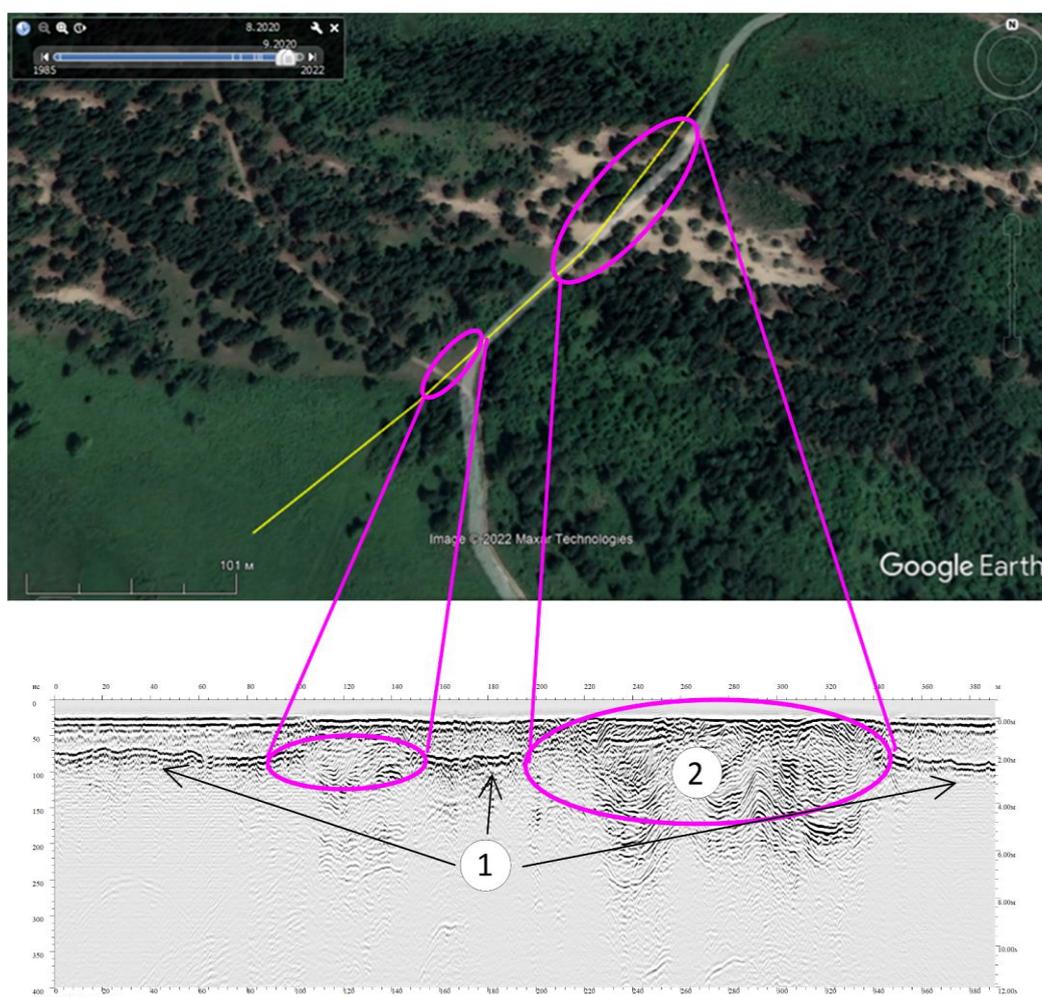


Рисунок 42. Соотношение расположения профиля и разреза на лесном участке объекта “Ельник”. Условные обозначения: 1 – кровля мерзлых пород, 2 – области развития эоловых песков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Георадиолокация показала себя как эффективный метод исследования мерзлоты в Тункинской котловине. Объекты исследования сложены преимущественно песками и торфами, а эти среды благоприятны для распространения электромагнитных волн. Это позволяет выделять и изучать границы кровли ММП на исследуемой территории.

Были выявлены границы залегания кровли мерзлых пород на объекте “Ельник”. На лесном участке она залегает на глубине от 70 до 130 см, выклиниваясь полностью в эоловых песках. Это связано с отсутствием воды в этих отложениях, что не позволяет мерзлоте в них образовываться. На болотном участке полученные глубинные разрезы четко показывают границы кровли ММП на глубине 70-120 сантиметров, при этом выходы солоноватых вод затрудняют определение границы, не позволяя радару сканировать среду. Объект “Ельник” считается нетронутым в плане деятельности человека, при этом на нем мы видим, что граница мерзлоты находится близко к земной поверхности даже в летнее время.

Обработка годографа на объекте “Залежь” показала, что приповерхностные грунты там не промерзшие. В верхней части разреза находятся невлагонасыщенные пески, в нижней – влагонасыщенные. Также на объекте были выделены перспективные участки для заложения скважин для мониторинга температуры грунтов при помощи АПИК. Антропогенно измененные грунты, а также пострадавшие от пожаров участки на залежи привели к опусканию мерзлоты на глубины 8-12 метров. При этом на участках кустистой растительности эта граница залегает значительно выше - на уровне 4-5 метров. В данном случае видна зависимость влияния человеческой деятельности на деградацию ММП.

Список использованных источников и литературы

1. Permafrost observations in Russia: current status and further needs. O. Anisimov State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia
2. Ponomarev E, Masyagina O, Litvintsev K, Ponomareva T, Shvetsov E, Finnikov K. The Effect of Post-Fire Disturbances on a Seasonally Thawed Layer in the Permafrost Larch Forests of Central Siberia. *Forests*. 2020; 11(8), С. 790.
3. Ангахаева, Н.А. Гидрогеологические условия водопользования в Тункинском национальном парке (Бурятия). Проблемы геологии и освоения недр, Труды XXV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 120-летию горно-геологического образования в Сибири, 125-летию со дня основания Томского политехнического университета, 2021, С. 515-517.
4. Анисимов О. А., Лавров С. А. Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: оценка рисков для производственных объектов ТЭК, Технологии ТЭК, № 3, 2004, С. 78-83.
5. Анисимов, О.А., Ю.А. Анохин, С.А. Лавров и Г.В. Малкова. Континентальная многолетняя мерзлота. Методы изучения последствий изменений климата для природных систем, ВНИИГМИ, 2012. С. 268-328.
6. Арабский А.К., Арно О.Б., Балтабаев Ш.Г., Серебряков Е.П., Лебедев М.С., Лебедева Е.Т. Технология управления рисками аварийных ситуаций на объектах добычи и транспорта газа Ямбургского НГКМ, связанных с воздействием сил морозного пучения на свайные фундаменты. Проблемы анализа риска, 2017, 14(2), С. 84-91.
7. Атутова, Ж. В. Основные тенденции восстановительной динамики аграрно трансформированных геосистем Тункинской котловины. Ж. В. Атутова, О. А. Екимовская, Известия Иркутского государственного университета, 2019, С. 16-31.

8. Ахаржанова Т.В. Хозяйственное освоение ландшафтов Тункинской котловины. Вестник Бурятского государственного университета. Биология. География, по. 3, 2004, С. 117-125.
9. Белозерцева, И.А. и А.А. Черкашина, 2013. Почвы и их использование в Тункинской котловине. Вестник российских университетов. Математика, 2013, С. 945-949.
10. Буффар Т., Урюпова Е., Доддс К., Романовский В.Е., Беннетт А., Стрелецкий Д. Научное сотрудничество: мониторинг вечной мерзлоты циркумполярной зоны и обмен данными. Арктика и Север. 2021, С. 184-208.
11. Василенко Е.В., Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я., Наварро Ф.Х., Токарев М.Ю., Калашников А.Ю., Мирошниченко Д.Е., Резников Д.Е. Радиофизические исследования ледника Альдегонда на Шпицбергене в 1999 году. Материалы гляциологических исследований (90), 2001, С. 86-99.
12. Василенко О.В., Воропай Н.Н. Особенности формирования климата котловин Юго-Западного Прибайкалья. Известия Российской академии наук, Серия географическая, 2015, С. 104-111.
13. Владов, М.Л. и А.В. Старовойтов. Введение в георадиолокацию. Москва: Издательство МГУ, 2004, 153 с.
14. Воробьева, Г. А. Следы криогенеза в Тункинской рифтовой долине / Г. А. Воробьева. Юго-Западное Прибайкалье: особенности осадконакопления и почвообразования: Путеводитель экскурсии к конференции, посвященной 85-летию кафедры почвоведения ИГУ / Отв. редактор Г.А. Воробьева. – Иркутск: Иркутский государственный университет, 2016. – С. 35-37.
15. Выркин В. Б., Кузьмин В. А., Снытко В. А. Общность и различия некоторых черт природы Тункинской ветви котловин // География и природные ресурсы. – 1991. – № 4. – С. 61–68.

16. Выркин, В.Б. Современное экзогенное рельефообразование котловин байкальского типа, Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 1998, 175 с.
17. Генезис почв гор Прибайкалья. Копосов, Г.Ф., Новосибирск: Наука, 1983, 253 с.
18. Геокриология СССР. Средняя Сибирь / [С. М. Фотиев, К. А. Кондратьева, С. Ф. Хруцкий и др.]; Под ред. Э. Д. Ершова. - М.: Недра, 1989. - 413 с.
19. Геокриология. Характеристики и использование вечной мерзлоты. В 2 т. Т 1/под редакцией А.В.Брушкова; пер. В.А.Сантаевой и А.В.Брушкова. - Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2020. - 437 с.
20. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Алдано-Забайкальская серия. Лист М48 – Улан Удэ. Объяснительная записка. – СПб. Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2009. 271 с. + 3 вкл. Минприроды России, Роснедра, ФГУП «ВСЕГЕИ», ГФУП «Бурятгеоцентр».
21. Гулин Д.А., Паршикова М.А., Файзуллина Э.В. Об этапах воздействия морозного пучения грунта на подземные трубопроводы, Нефтегазовое дело. 2022. Т. 20, № 1. С. 65–73.
22. Дубинин А. П. Многолетнемерзлые породы и влияние на них работы нефтепромысла на примере Чаяндинского нефтегазоконденсатного месторождения. Материалы VIII Всероссийской научной студенческой конференции с элементами научной школы имени профессора М. К. Коровина, Томск: Изд-во ТПУ, 2015, С. 412-415.
23. Дьяков, А. Ю. Методические основы георадарных исследований горнотехнических объектов / А. Ю. Дьяков, А. И. Калашник. — Апатиты : Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2021, 110 с.
24. Ермаков, А.П. и А.В. Старовойтов. Применение метода георадиолокации при инженерно-геологических исследованиях для оценки геокриологической обстановки. Вестник Московского университета, 6, 2010, С. 91-96.

25. Замана Л.В. Глубокозалегающие многолетнемерзлые породы во впадинах Северного Прибайкалья, Геокриологические условия зоны Байкало-Амурской магистрали. – Якутск: Издательство Ин-та мерзлотоведения СО АН СССР, 1980, С. 31-38.
26. Изюмов С.В., Дручинин С.В., Вознесенский А.С. Теория и методы георадиолокации: Учеб. пособие. — М.: Издательство «Горная книга», 2008. — 196 с.
27. Иркут. Большая советская энциклопедия: [в 30 т.]. Гл. ред. А. М. Прохоров, 3-е изд., М.: Советская энциклопедия, 1969—1978.
28. Каверина, Р.З. Опыт эксплуатации ВЛ в мерзлых грунтах и пути решения по предотвращению технологических нарушений, связанных с пучением грунтов, ОАО Фирма ОРГРЭС, 2016.
29. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: Строение и геологическая история. Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М. и др. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001. - 252 с.
30. Кайнозойский континентальный рифтогенез: Путеводитель геологической экскурсии в Тункинскую рифтовую долину / С.В. Рассказов, В.А. Саньков, В.В. Ружич, О.П. Смекалин. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2010. 40 с.
31. Картушин, В.А. Агроклиматические ресурсы юга Восточной Сибири, Иркутск: Вост.-Сибирское книжное издательство, 1969, 100 с.
32. Конищев, В. Н. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата. В. Н. Конищев. Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2009. – № 4. – С. 10-20
33. Копосов Г. Ф. Генезис гор Прибайкалья. – Новосибирск: Наука, 1983, 255 с.
34. Кроник Я. А. Анализ аварийности и безопасности геотехнических систем в криолитозоне. Материалы V конф. геокриологов России. МГУ им. М. И. Ломоносова. М.: Университетская книга, 2016, С. 104-113.

35. Лещиков Ф.Н. Многолетнемерзлые породы. В кн.: Гидрогеология СССР. Т. XIX. Иркутская область. М., «Недра», 1968, С. 80-82.
36. Ливеровский, Ю.А. Зональность почвенного покрова предгорных территорий. Ю.А. Ливеровский, Э.А. Корнблум, Известия АН СССР. - Сер. географическая, 1960, С. 5-16.
37. Логачев Н.А. Кайнозойские континентальные отложения впадин байкальского типа. // Изв. АН СССР, Серия геол., 1958, №4, С. 18-29.
38. Лопатин, Д.В. Геоморфология восточной части Байкальской рифтовой зоны, Новосибирск: Наука, 1972, 115 с.
39. Некрасов И.А., Соловьева Л.Н. Новая карта морфологии криолитозоны Забайкалья // Геокриологические исследования. Якутск. - 1971. - С. 96-99
40. Омеляненко А.В. Научно-методические основы георадиолокации мерзлых горных пород: специальность 25.00.08 "Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение": специальность 25.00.22 "Геотехнология (подзем. открытая и строит.)": автореф. дис. на соиск. учен. степ. д-ра канд. техн. наук / Омеляненко Александр Васильевич; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т мерзлотоведения им. акад. П. И. Мельникова. - Якутск, 2001, 47 с.
41. Основные природные и социально-экономические последствия изменения климата в районах распространения многолетнемерзлых пород: прогноз на основе синтеза наблюдений и моделирования. Оценочный отчет. Под ред. О. А. Анисимова. М.: Greenpeace, 2009, 82 с.
42. Равский, Э.И.. Осадконакопление и климаты Внутренней Азии в антропогене, М.: Наука, 1972, 336 с.
43. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 16. Ангаро-Енисейский район. Выпуск 3. Забайкалье/ Под ред. В. И. Зильберштейн. — Л.: Гидрометеиздат, 1966, 159 с.

44. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 16. Ангаро-Енисейский район. Вып. 2. Ангара. Под ред. Т. С. Кирилловой, Н. Н. Корчажниковой, Л.: Гидрометеиздат, 1965, 223 с.
45. Рифтовые впадины Прибайкалья: тектоническое строение и история развития. О.В. Лунина, А.С. Гладков, Н.Н. Неведрова. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2009, 310 с.
46. Самбург, А.Л. Геологическая карта СССР. М-б 1:200 000. Сер. Восточно-Саянская. Лист М-47-VI. Объяснительная записка. М., 1971, 52 с.
47. Сейсмогеология и детальное сейсмическое районирование Прибайкалья. Ред.: В.П. Солоненко, В.С. Хромовских, С.И. Голенецкий и др., Новосибирск: Наука, 1981, 168 с.
48. Смольянинов В. М. Общее землеведение: литосфера, биосфера, географическая оболочка. Учебно-методическое пособие. В.М. Смольянинов, А. Я. Немькин. – Воронеж: Истоки, 2010, 193 с.
49. Справочник путешественника и краеведа, том 2. Под ред. С. В. Обручева, Государственное издательство географической литературы, Москва, 1949, 698 с.
50. Судакова М.С., Владов М.Л. Современные направления георадиолокации. // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. — 2018.— №2 — С. 3-12
51. Судакова, М.С., М.Р. Садуртдинов, А.М. Царев, А.Г. Скворцов и Г.В. Малкова. Возможности георадиолокации для исследования заболоченных торфяников в криолитозоне. Геология и геофизика, 7, 2019, С. 1003-101.
52. Тумель, Н. В. Геоэкология криолитозоны: учеб. пособие для бакалавриата и магистратуры / Н. В. Тумель, Л. И. Зотова. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2018, 180 с.

53. Филиппова, А. А. Влияние глобального потепления на железобетонные конструкции / А. А. Филиппова, Г. А. Сергеева. Молодой исследователь Дона. – 2021. – № 5(32). – С. 73-78.
54. Черкашина, А.А., В.А. Голубцов и А.В. Силаев. Постагрогенная трансформация почв Тункинской котловины (Юго-Западное Прибайкалье). Известия Иркутского государственного университета, 2015, С. 128-140.
55. Чернышева И.А., Мащенко А.В. К вопросу использования различных методов защиты от морозного пучения. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура, 2016, С. 39-46.
56. Шац М.М. Вечная мерзлота как камень преткновения, или Время спасти вечную мерзлоту. Территория и планирование – 2010 - № 3(27).
57. Шепелев В.В., Шац ММ. Геоэкологические проблемы обводнения и подтопления территории г. Якутска. Наука и образование. — 2000. — №3. — С. 68-71.
58. Щетников, А. А. Структура рельефа и новейшая тектоника Тункинского рифта: (Юго-Запад. Прибайкалье) / А. А. Щетников; А. А. Щетников, Г. Ф. Уфимцев ; отв. ред. А. И. Киселев ; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т земной коры. – Москва: Науч. мир, 2004, 160 с.

Интернет-ресурсы:

59. Большая российская энциклопедия. Дата обращения 11.05.2022.
bigenc.ru/geology/text/5556854
60. Деградация вечной мерзлоты: чем она грозит северным городам и предприятиям. Дата обращения 02.05.2022
www.bbc.com/russian/features-53077398
61. Заброшенная железная дорога Чум — Салехард — Игарка. Дата обращения: 29.04.2022 tourister.ru/photoreps/1117.

62. Кинематика кратных отраженных волн и основы метода общей глубинной точки. Дата обращения 10.05.2022. present5.com/kinematika-kratnykh-otrazhennykh-voln-i-osnovy-metoda-obshhej/
63. Мерзлоте закон не писан. Дата обращения 05.05.2022 transportrussia.ru/razdely/avtomobilnye-dorogi/8129-merzlote-zakon-ne-pisan.html.
64. Мертвая дорога. Или как утопить в болотах и тундре десятки тысяч жизней. Дата обращения: 28.04.2022 yablor.ru/blogs/mertvaya-doroga-ili-kak-utopit-v-bo/6776371.
65. Мраморное дно р. Кынгырга. Дата обращения 23.02.2022 tunkarpark.ru/business/turizm/pamyatniki-prirody/130-1-mramornoe-dno-r-kyngyrga.html.
66. Потанин: "Норникель" восстановит экосистему в районе разлива топлива. Дата обращения 02.05.2022 ren.tv/news/v-rossii/707537-potandin-nornikel-vosstanovit-ekosistemu-v-meste-razliva-topliva
67. Circum-arctic map of permafrost and ground ice conditions / Brown. — Текст: электронный, Data basin : [сайт]. — URL: <https://databasin.org/datasets/1f624a31ab224835a78ad4bf11103419/> (дата обращения: 02.05.2022).
68. Тункинский национальный парк. Дата обращения 23.02.2022 baikaltravel.ru/places/national-parks/921/.