

Транспортные сооружения / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2025, Том 12, № 4 / 2025, Vol. 12, Iss. 4 <https://t-s.today/issue-4-2025.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/04SATS425.pdf>

DOI: 10.15862/04SATS425 (<https://doi.org/10.15862/04SATS425>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Добров, Э. М. Анализ способов послойной разработки оттаивающих грунтов при устройстве оснований аэродромных покрытий в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов / Э. М. Добров, А. В. Голишевский // Транспортные сооружения. — 2025. — Т. 12. — № 4. — URL: <https://t-s.today/PDF/04SATS425.pdf>. DOI: 10.15862/04SATS425.

**For citation:**

Dobrov E.M., Golishevskiy A.V. Analysis of layer-by-layer excavation methods for thawing soils in permafrost-prone airfield pavement bases. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2025;12(4): 04SATS425. Available at: <https://t-s.today/PDF/04SATS425.pdf>. DOI: 10.15862/04SATS425. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 624.139.55:625.717.2

**Добров Эдуард Михайлович**

ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», Москва, Россия  
Профессор  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: [accord37@mail.ru](mailto:accord37@mail.ru)

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=312656](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=312656)

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7005947131>

**Голишевский Андрей Вячеславович**

ФГУП «Государственный проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт гражданской авиации “Аэропроект”», Москва, Россия  
Инженер

E-mail: [agolishevskiy@yandex.ru](mailto:agolishevskiy@yandex.ru)

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1311892](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1311892)

## **Анализ способов послойной разработки оттаивающих грунтов при устройстве оснований аэродромных покрытий в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов**

**Аннотация.** Авторами представлен анализ технологии послойной разработки оттаивающих многолетнемерзлых грунтов при устройстве оснований аэродромных покрытий в условиях I дорожной-климатической зоны (вечная мерзлота). В статье рассматриваются проблемы, возникающие при реализации классической схемы замены слабых грунтов, связанной с необходимостью дожидаться полного сезонного оттаивания деятельного слоя с последующей его разработкой на всю глубину. Отмечены ограничения использования этой схемы при устройстве оснований аэродромных покрытий, связанные с большими объемами земляных работ, коротким строительным сезоном, характерным для I дорожной-климатической зоны, а также достижением максимальной глубины деятельного слоя в конце летнего периода.

В статье описан альтернативный метод — послойная разработка грунта по мере его естественного оттаивания под действием солнечной радиации и наружного воздуха. Авторами представлены два варианта реализации технологии: с равной толщиной удаляемых слоёв и с равными временными интервалами между выборкой талого грунта. Для оценки эффективности

предложенных подходов проведено численное моделирование в среде GeoStudio (модуль GeoSlope) с использованием модели Стефана для учёта фазовых переходов в грунте. Приведены сравнительные графики динамики фронта оттаивания и глубины разработки, отражающие зависимость скорости оттаивания и разработки от выбранной технологии.

Полученные результаты показывают, что метод послойной разработки позволяет существенно ускорить достижение проектной глубины без применения искусственного обогрева, при этом вариант с равными толщинами слоёв демонстрирует лучшие показатели с точки зрения временных и материально-технических затрат.

**Ключевые слова:** талый слой; мерзлый грунт; Задача Стефана; вечная мерзлота; земляные работы; процесс оттаивания; деятельный слой

## Введение

Строительство аэродромов в условиях вечной мерзлоты (I Дорожно-климатическая зона — I ДКЗ) играет ключевую роль в развитии транспортной инфраструктуры северных территорий нашей страны [1]. Технологии замены слабых грунтов в основании на грунты с высокой несущей способностью являются критически важными для обеспечения надёжности и долговечности аэродромных покрытий. Однако применение стандартных методов в этих условиях затруднено из-за специфики талых грунтов, которые характеризуются низкой несущей способностью и особыми теплофизическими свойствами.

Многолетнемерзлые грунты являются многокомпонентными и включают в себя минерализованные фракции, органические включения, ледяные прослойки и поровую воду. Свойства многолетнемерзлых грунтов достаточно хорошо изучены. Эти грунты обладают высокой прочностью в мерзлом состоянии, однако при оттаивании перестают удовлетворять требованиям по несущей способности, а также проявляют ползучесть и релаксацию под нагрузкой и с течением времени [2–4].

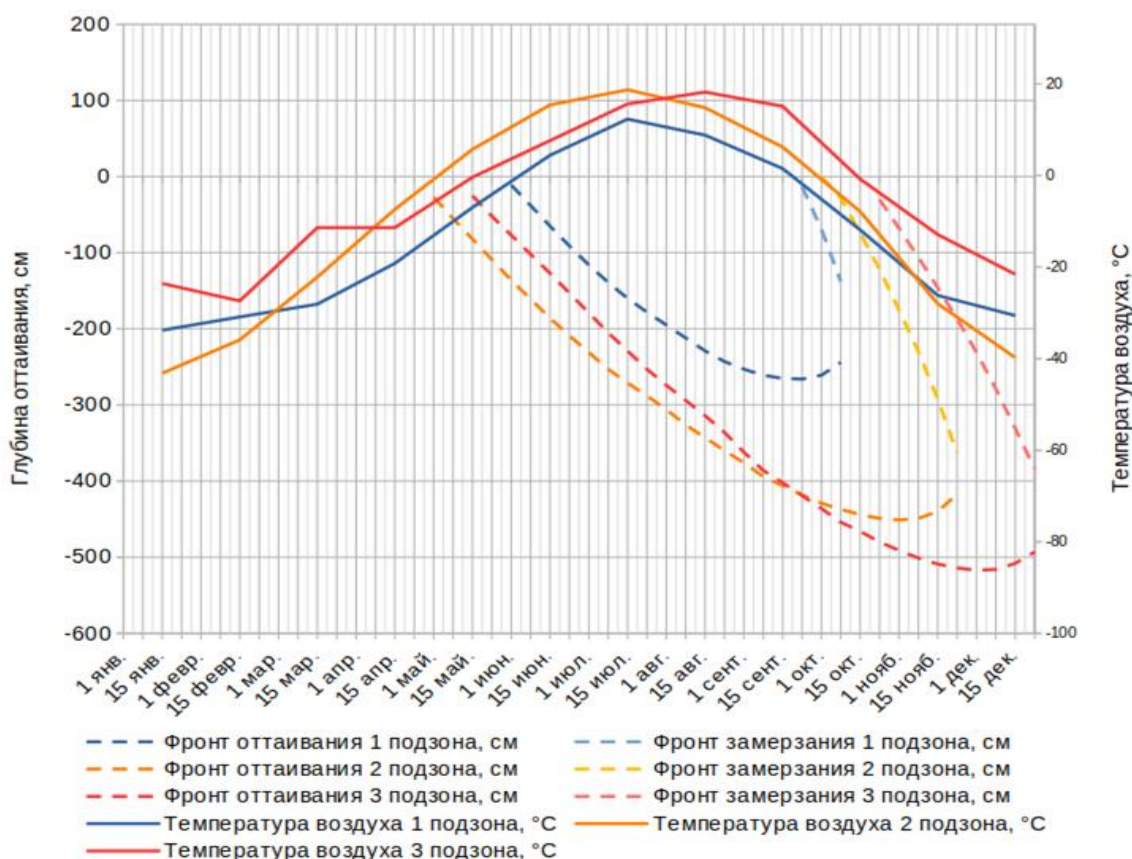
В практике инженерного мерзлотоведения выработаны два основных принципа использования мерзлых грунтов в качестве оснований. Первый принцип — сохранение мерзлого состояния грунтов в течение всего срока эксплуатации сооружения. Он реализуется за счёт минимизации теплового воздействия на грунт: сохранение теплоизолирующего растительного покрова, возведение высоких насыпей из несвязных грунтов, применение утеплителей и устройств термостабилизации (вентилируемые подполья, термосифоны и т. п.), использование теплоизоляционных пенополистирольных плит [5]. Вторым принципом — использование грунтов основания в оттаявшем или частично оттаявшем состоянии. В этом случае производится предпостроечное оттаивание мерзлых грунтов до расчётной глубины перед началом возведения сооружения либо допускается контролируемое оттаивание грунта уже в период эксплуатации.

В данном исследовании рассматривается устройство основания аэродромов по первому принципу, то есть при возведении и эксплуатации грунты основания должны находиться в мерзлом состоянии. Для этого необходимо удалить слабые грунты на глубину деятельного слоя и заменить их на стабильные песчаные с требуемой несущей способностью. Разработка грунтов может производиться как в мерзлом состоянии, так и в талом. Мёрзлые горные породы отличаются высокой прочностью по сравнению с талым грунтом. При переходе грунта из талого состояния в мёрзлое, его прочностные характеристики возрастают на порядок: например, при охлаждении грунта до  $-1^{\circ}\text{C}$  сопротивление резанию возрастает в 10–20 раз. Энергозатраты на разрушение мерзлого массива увеличиваются в 10–15 раз, а производительность землеройной техники снижается на 50–60 % [6; 7].

Поскольку разработка в мерзлом состоянии требует применения специального оборудования и обусловлена значительными трудовыми и материальными затратами, представляет интерес рассмотреть вариант разработки грунта в талом состоянии [8]. Для этого требуется дожидаться их полного оттаивания, после чего разработать и транспортировать в отвал.

К аэродромным покрытиям (взлётно-посадочные полосы, рулѐжные дорожки, перроны) предъявляются жѐсткие требования, касающиеся деформаций основания. Допустимые просадки крайне малы, поскольку любые неровности могут повлиять на безопасность выполнения взлетно-посадочных операций воздушными судами. В районах вечной мерзлоты инженерно-геологические условия осложняются наличием многолетнемерзлых грунтов, способных существенно терять прочность при оттаивании. При повышении температуры грунта выше 0°C лёд в порах и прослойках тает, в результате чего прочный мерзлый грунт переходит в водонасыщенную суспензию с низкой несущей способностью [9]. Если основание аэродромного покрытия включает такие талые просадочные грунты, под нагрузкой от самолѐтов и собственного веса покрытия они дают неравномерную осадку. Кроме того, в процессе сезонного промерзания может происходить морозное пучение, а при следующем оттаивании — дополнительная просадка, усугубляющая деформации покрытия.

Основной особенностью устройства оснований аэродромов в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов является большой объѐм земляных работ и короткий летний период, поэтому реализация схемы замены слабых грунтов после полного оттаивания представляется сложно реализуемой. Также следует иметь ввиду, что оттаивание и промерзание деятельного слоя носит инерционный характер, из-за чего достижение максимальной глубины оттаивания может происходить в конце летнего сезона, что еще сильнее усугубляет сложности в использовании этой технологической схемы.



**Рисунок 1.** Глубина оттаивания грунта и температура воздуха в течение года для 3 подзон I ДКЗ (разработано авторами)

На рисунке 1 представлены графики оттаивания грунтов в течение года и соответствующие значения температуры воздуха. Значения глубин оттаивания получены в ходе моделирования. Анализ графиков годового хода температуры и оттаивания грунтов показывает, что в центральных подзонах I ДКЗ максимальная глубина деятельного слоя достигается лишь к середине осеннего периода, а южных к концу периода. Это значит, что начало работ по замене грунтов приходится на время, когда летний сезон уже близится к завершению, что делает выполнение масштабных земляных работ в рамках строительства аэродромных покрытий практически невыполнимым в отведенные сроки. Также на графиках видно, что в южных подзонах на момент достижения максимальной глубины деятельного слоя верхние слои грунта начинают промерзать, что также делает невозможным выполнение разработки грунтов без применения специальных методов.

Одним из рациональных вариантов выполнения замены слабых грунтов в зоне вечной мерзлоты является метод послойной разработки грунта по мере его оттаивания. Этот подход успешно применяется при подготовке мерзлых россыпей месторождений и основан на использовании солнечной радиации и наружного воздуха в качестве источников тепла, поступающего в мерзлый грунт в сочетании с регулярным удалением оттаявших грунтов [10].

Суть метода заключается в том, что по мере естественного прогрева и оттаивания верхнего слоя мерзлого грунта производится его разработка землеройной техникой и удаление. Затем процесс повторяется для следующего слоя, что позволяет эффективно использовать доступное время летнего сезона без ожидания полной глубины оттаивания. Этот подход не только ускоряет общий процесс работ, но и позволяет равномерно распределить использование ресурсов.

Метод послойной разработки начал своё развитие ещё в начале XX века в практиках золотодобычи: первые методики оттаивания мерзлоты (разведение костров, заливка горячей воды и пара) были направлены на послойное размораживание породы для её последующей выемки. Уже к 1910-м годам в Канаде и на Аляске появились экономичные технологии холодного водяного оттаивания (методы Майлса и Пирса), которые обеспечивали управляемое послойное протаивание грунта без чрезмерного разжижения. Эти наработки были впоследствии переняты и развиты в СССР, получив распространение в гражданском строительстве северных территорий [11]. Таким образом, послойное оттаивание грунтов имеет более чем вековой опыт применения, показывая свою эффективность в условиях льдистых мерзлых пород.

Под послойной разработкой понимается технология, при которой мерзлый грунт разрабатывают не сразу на всю требуемую глубину, а последовательно по мере оттаивания слоями толщиной 0,3–0,8 м. Технология реализуется в тёплое время года (весенне-летний период) либо круглый год с применением искусственных способов прогрева. Последовательность выполнения работ следующая: с поверхности грунта снимают растительный слой и утепляющие покровы (например снег, торф), затем верхний слой мерзлоты подвергается оттаиванию естественным теплом или с применением нагревателей. Как только этот слой теряет прочность (переходит в пластичное состояние), его разрабатывают землеройной техникой (бульдозером, экскаватором) и удаляют с площадки. Затем процесс повторяется для следующего, нижележащего слоя мерзлоты. Таким образом, фронт оттаивания постепенно смещается вниз, а глубина котлована увеличивается. Основное преимущество метода — контроль над глубиной протаивания и состоянием талого грунта.

Наиболее дешевым представляется вариант послойной разработки мерзлого грунта с применением солнечно-радиационного метода, который основан на использовании естественной солнечной энергии для прогрева и оттаивания мерзлого грунта. В основе лежит сохранение естественных механизмов теплопередачи в грунте при направленном изменении условий на его поверхности для максимального поглощения солнечной радиации. Практически это

достигается удалением либо уменьшением теплоизоляционного покрова грунтов основания. Например, поверхность участка очищают от снежно-растительного слоя и затем покрывают тёмным материалом (угольной пылью, шлаком и т. п.) для снижения альбедо. Также применяются прозрачные плёночные покрытия, создающие парниковый эффект и препятствующие потере тепла с поверхности грунта [12]. В результате скорость оттаивания грунтов увеличивается, что позволяет быстрее выполнять земляные работы.

Главным достоинством солнечно-радиационного способа является отсутствие необходимости во внешних источниках энергии — оттаивание осуществляется за счёт возобновляемого тепла Солнца, практически без затрат топлива и электроэнергии [13]. Это позволяет одновременно охватывать большие площади оттаивания при минимальных эксплуатационных расходах. По этой причине радиационный метод с середины XX века получил широкое распространение при разработке мерзлых россыпных месторождений, позволяя вести работы на больших полигонах с минимальными трудовыми и материальными затратами [14]. В районах с высокой инсоляцией данный метод чрезвычайно эффективен: так, более 60 % территории России, включая основные добычные районы Восточной Сибири и Забайкалья, характеризуются значительным среднесуточным приходом солнечной энергии 3,5–4,5 кВт·ч/м<sup>2</sup>. Это означает, что естественное солнечное тепло способно обеспечить существенный объём теплопередачи в грунт. Солнечно-радиационный метод считается наиболее малозатратным способом подготовки мерзлого массива к выемке пород, поскольку использует этот естественный тепловой потенциал [6]. Кроме того, метод экологически чист в том смысле, что не требует сжигания топлива на обогрев грунта и не создает локальных выбросов парниковых газов или продуктов сгорания, связанных, например, с применением паровых или электрических обогревателей.

Цель данного исследования — проанализировать применение метода послойной разработки грунта в условиях аэродромного строительства в двух вариантах: разработка оттаявшего грунта через равные временные интервалы и на разработку равными толщинами снимаемых слоёв по мере достижения соответствующих глубин оттаивания.

Научная новизна работы состоит в выявлении взаимосвязи между последовательностью и толщины снятия слоёв и динамикой теплового потока в грунтовом массиве, что позволяет оптимизировать технологический график выполнения земляных работ по замене слабых грунтов. Практическая значимость заключается в определении достоинств и недостатков каждого варианта послойной разработки и их применимости для устройства оснований аэродромных покрытий в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов.

## Методы

В ходе исследования было проведено моделирование оттаивания мерзлого грунта при его послойной разработке. Были рассмотрены два варианта — первый предполагает разработку грунта слоями одинаковой мощности по мере оттаивания грунта требуемой глубины. Второй вариант — разработка грунта через равные интервалы времени (с одинаковой периодичностью) на глубину, которая на тот момент оттаёт. В качестве контрольного варианта было принято естественное оттаивание деятельного слоя в городе Якутск (2 подзона 1 ДКЗ) без разработки грунта. Этот вариант будет сравниваться с вариантами разработки грунта в процессе оттаивания основания. Было принято, что проектом заложена разработка слабых грунтов на глубину 2 м.

Для моделирования процессов теплопередачи использовалась классическая модель Стефана, позволяющая учесть влияние фазовых переходов воды при оттаивании грунта [15]. В таблице 1 приведены средние ежемесячные температуры наружного воздуха для города Якутск (2-я подзона I ДКЗ).

Таблица 1

Среднемесячные температуры наружного воздуха (Якутск, ДКЗ I<sub>2</sub>)

Температура наружного воздуха, °С												
Средняя по месяцам												
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Якутск	-23,6	-19,7	-9,8	1,2	8,8	13,6	15,2	13,4	7,8	-0,2	-11,4	-19,7

Взято из ОДМ 218.2.095-2019 «Методические рекомендации по проектированию земляного полотна на вечной мерзлоте с использованием местных грунтов»

Моделирование теплового режима мерзлых грунтов и процессов оттаивания проводилось с использованием программного комплекса GeoStudio (модуль GeoSlope), широко применяемого для анализа тепловых, деформационных и фильтрационных процессов в грунтах. В рамках данной работы использовался численный термический анализ с учётом фазовых переходов влаги в грунте, реализуемый средствами термального модуля TEMP/W. Модель учитывала зависимость теплофизических характеристик грунтов от состояния (мерзлое/талое), а также влияние переменного климатического воздействия через граничное условие на поверхности. С помощью встроенных функций моделировалась послойная выемка оттаявшего грунта, реализуемая через перемещение граничного условия обогрева на соответствующую глубину. Такой подход позволяет воспроизвести реалистичную динамику теплообмена при различных вариантах технологии разработки основания. Характеристики грунтов, учтённые при моделировании, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики грунтов, принятые при моделировании

Характеристики	Грунт основания	
	мерзлый	талый
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	1,66	1,55
Объёмная теплоёмкость, Дж/(м <sup>3</sup> ·°С)·10 <sup>-6</sup>	2,15	3,15

Разработано авторами

Исследование проводилось для условного календарного года, в связи с этим работы по удалению каждого слоя привязаны к конкретным датам.

Результаты

В первом приближении было проверено, как на итоговое время оттаивания основания на глубину деятельного слоя влияет послойная разработка грунта одинаковыми слоями по 50 см по мере оттаивания, то есть при переменном временном интервале между удалением слоев грунта.

20 мая отметка оттаивания достигла -51 см. В связи с этим было смоделировано вскрытие грунта до отметки -50 см. Первое же снятие талого грунта показало существенное ускорение оттаивания — на следующие сутки после разработки глубина оттаивания составила 75 см, хотя без разработки в этот день глубина оттаивания достигала -54 см. Таким образом, на отметке -50 см вскрытие грунта привело к оттаиванию нижележащего грунта на 24 см за сутки вместо оттаивания на 4 см за сутки.

Далее, через 6 суток, 26 мая, оттаивание достигло -102 см, поэтому был вскрыт грунт на отметке -100 см. Через сутки оттаивание достигло отметки -127 см, то есть за сутки оттаяло 25 см.

Еще через 5 суток, 31 мая, оттаивание достигло -152 см, вскрыт грунт до отметки -150 см. Через сутки оттаивание достигло отметки -178 см, то есть за сутки оттаяло 26 см.

Отметим, что оттаивание за первые сутки после разработки грунта увеличивается на 1 см, что связано с тем, что на момент вскрытия каждого следующего слоя температура воздуха выше.

Далее, через 5 суток, 5 июня, оттаивание достигло -205 см, вскрыт грунт до отметки -200 см. Через сутки оттаивание достигло отметки -230 см, то есть за сутки оттаяло 25 см. Далее оттаивание происходило без вмешательства.

В итоге оттаивание до проектной глубины в 2 м при производстве разработки грунта по мере оттаивания слоями по 50 см произошло за 35 суток вместо 78 суток при оттаивании без вмешательства (при отсчете от начала положительных температур воздуха).

При этом стоит отметить, что достижение максимальной глубины деятельного слоя в обоих вариантах произошло примерно одновременно (хоть и на разные глубины), то есть оно прямо зависит от хода температур воздуха, которые в рассматриваемых вариантах были идентичны.

Таким образом, подтверждается интенсификация оттаивания при послойной разработке на равные толщины.

Далее был рассмотрен вариант, когда разработка производится через равные промежутки времени на переменную глубину оттаивания, то есть глубину, которая за данный период времени успеет оттаять при данной температуре воздуха.

Положительные температуры в рамках исследования наступают 2 мая, как и начало оттаивания. В качестве интервала разработки принят период, равный 7 дням.

При варианте с регулярной разработкой раз в неделю на глубину талого грунта разработка началась раньше — через неделю после начала положительных температур грунт оттаял на 21 см и был удален. В первом же варианте требовалось дожидаться оттаивания грунта на глубину 50 см со скоростью естественного таяния. В этот раз данная глубина была достигнута раньше за счет ускорения оттаивания дополнительным снятием слоя 21 см, которое интенсифицировало таяние.

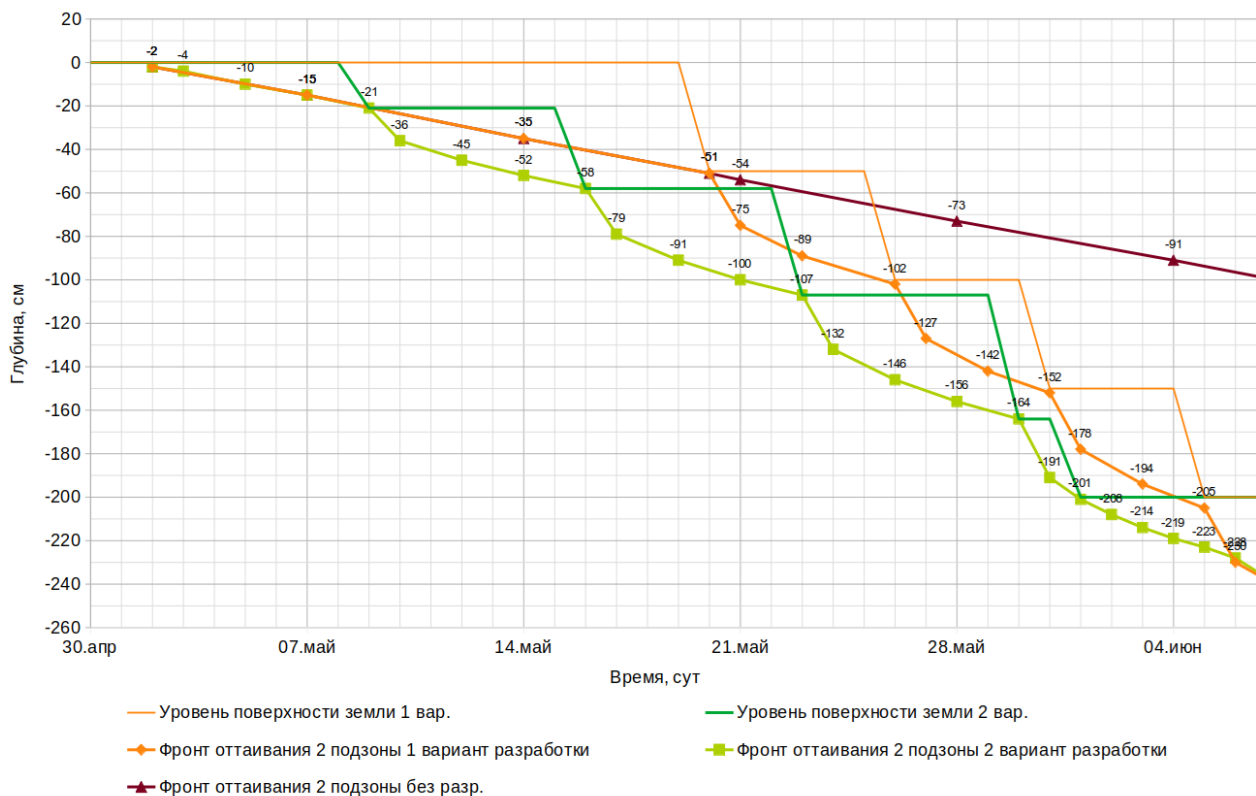
В итоге во 2 варианте проектная глубина в 2 м была достигнута на 4 суток раньше, однако при этом длительность потока выполнения земляных работ во 2 варианте оказалась равна 23 суток, на 10 суток больше, чем в 1 варианте. В 1 варианте было выполнено 4 операции разработки и снято 4 слоя по 50 см. Во 2 варианте потребовалось 5 операций разработки, в результате которых были сняты слои 21 см, 37 см, 49 см, 57 см, и снятием слоя 37 см была достигнута проектная отметка.

На рисунке 2 представлен график, на котором для обоих вариантов представлены глубины оттаивания основания с учетом удаления талых грунтов, кривая глубины положения границы раздела фаз и кривая уровня поверхности земли. Также для сравнения на график нанесена кривая оттаивания грунта для контрольного случая, когда разработка грунта не производится.

На графике видно, что рассматриваемые варианты разработки отличаются продолжительностью выполнения работ, календарными датами начала работ, а также необходимым количеством проходок землеройной техники. Так, при первом варианте (со снятием талого грунта постоянной мощности) работы начались позже, так как необходимо было дожидаться оттаивания грунта на глубину 50 см. Однако благодаря тому, что температура воздуха на момент начала работ выше, чем во втором варианте, оттаивание началось интенсивнее, что позволило выполнить работы быстрее.

Во втором варианте напротив, работы начались на две недели раньше, однако завершены работы были всего на 5 дней раньше, чем при первом варианте. К тому же, второй вариант

потребуется выполнение дополнительной проходки для достижения проектной отметки котлована, что приводит к росту затрат на производство земляных работ.



**Рисунок 2.** Сравнение вариантов послойной разработки. Графики оттаивания и разработки (разработано авторами)

### Обсуждение

Результаты моделирования послойной разработки с постоянной толщиной слоя и с постоянной периодичностью снятия слоев подтверждают эффективность метода, показывая возможность достижения существенной глубины разработки в значительно более сжатые сроки.

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Классическая схема замены слабых грунтов не может быть эффективно применена в условиях короткого летнего сезона и медленного оттаивания грунтов. Максимальное оттаивание грунтов достигается в конце летнего периода, что не оставляет достаточного времени для завершения необходимых работ.
2. Одним из рациональных вариантов является метод послойной разработки грунта по мере оттаивания. Этот метод наиболее применим в условиях вечной мерзлоты и уже используется в других отраслях, таких как разработка мерзлых россыпей месторождений.
3. Метод равных толщин (вариант 1) обеспечивает минимальную продолжительность выполнения земляных работ и меньшее число проходок техники — что благоприятно с точки зрения затрат ресурсов. Метод через равные интервалы времени (вариант 2) позволяет начать работы раньше, но в итоге требует больше этапов, что повышает затраты. Таким образом, при ограничениях по времени

(короткий летний сезон) и объёмах работ оптимальным представляется применение варианта 1.

В качестве развития данного исследования можно рассмотреть комбинированный подход, который мог бы предполагать начало выполнения работ со снятия слоёв малой мощности через равные интервалы времени в период небольших положительных температур, а затем переход на снятие слоёв фиксированной толщины после достижения определённой глубины или температуры воздуха. Такой комбинированный способ может добиться более раннего начала работ и минимизировать количество проходок.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зайцева, И.В. Исследование авиационной системы арктической зоны Российской Федерации / И.В. Зайцева, С.А. Бородулина // Транспортное дело России. — 2022. — № 1. — С. 159–161. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48242606>. — DOI: [10.52375/20728689\\_2022\\_1\\_159](https://doi.org/10.52375/20728689_2022_1_159). — EDN: [HOJJXE](https://www.edn.ru/record/1000900090). (дата обращения: 12.08.2025).
2. Вялов, С.С. Реология мерзлых грунтов / под ред. В.Н. Разбегина. — Москва: Стройиздат, 2000. — 463 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000900090>. (дата обращения: 12.08.2025).
3. Ершов, Э.Д. Основы геокриологии. Ч. 5: Инженерная геокриология / Э.Д. Ершов, Л.С. Гарагуля, Г.И. Гордеева и др.; под ред. Э.Д. Ершова. — М.: Изд-во МГУ, 1999. — 526 с.
4. Williams, P.J. The Frozen Earth: Fundamentals of Geocryology / P.J. Williams, M.W. Smith. — Cambridge: Cambridge University Press, 2009. — 306 p. — (Studies in Polar Research). — URL: [https://books.google.ru/books/about/The\\_Frozen\\_Earth.html?id=gn2H0AEACAAJ](https://books.google.ru/books/about/The_Frozen_Earth.html?id=gn2H0AEACAAJ). (дата обращения: 12.08.2025).
5. Загоруйко, Т.В. Конструктивные решения основания аэродромного покрытия на вечно мерзлых грунтах // Актуальные направления научных исследований: перспективы развития. Материалы II Всероссийской научно-практической конференции (Чебоксары, 28 июня 2023 года). — Чебоксары: Центр научного сотрудничества "Интерактив Плюс", 2023. — С. 94–96. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=agiseq>. — EDN: [AGISEQ](https://www.edn.ru/record/1000900090). (дата обращения: 12.08.2025).
6. Субботин, Ю.В. Подготовка мерзлых пород к выемке при разработке россыпных месторождений в Забайкальском крае / Ю.В. Субботин, Ю.М. Овешников, П.Б. Авдеев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2019. — № 3. — С. 125–133. — URL: <https://giab-online.ru/catalog/12724>. — DOI: [10.25018/0236-1493-2019-03-0-125-133](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-03-0-125-133). — EDN: [VWECIC](https://www.edn.ru/record/1000900090). (дата обращения: 12.08.2025).
7. Рашкин, А.В. Тепловая и водная подготовка горных пород при разработке мерзлых россыпей / А.В. Рашкин, П.Б. Авдеев, Ю.В. Субботин. — Москва: Горная книга (МГГУ), 2007. — 352 с. — ISBN 978-5-98672-077-7. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=rayorr>. — EDN: [RAYORR](https://www.edn.ru/record/1000900090). (дата обращения: 12.08.2025).
8. Желукевич, Р.Б. Разработка мерзлых грунтов землеройными машинами с дисковым инструментом: монография / Р.Б. Желукевич. — Красноярск:

- Сибирский федеральный университет, 2012. — 194 с. — ISBN 978-5-7638-2470-4. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006517968>. (дата обращения: 12.08.2025).
9. Цытович, Н.А. Механика мерзлых грунтов / Н.А. Цытович. — Москва: Высшая школа, 1973. — 446 с. — URL: <https://dwg.ru/dnl/1157>. (дата обращения: 12.08.2025).
  10. Потемкин, С.В. Разработка вечномерзлых россыпей / С.В. Потемкин. — Москва: Недра, 1969. — 152 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007332093>. (дата обращения: 12.08.2025).
  11. Cysewski, M.H. Pre-Thawing: From Mining to Civil Engineering; A Historical Perspective / M.H. Cysewski, Y. Shur // Cold Regions Engineering 2009: Cold Regions Impacts on Research, Design, and Construction. — Reston, VA: ASCE, 2009. — P. 1–10. — URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/41072%28359%294>. — DOI: [10.1061/41072\(359\)4](https://doi.org/10.1061/41072(359)4). (дата обращения: 18.12.2025).
  12. Esch, D.C. Thawing of Permafrost by Passive Solar Means // Proceedings of the Fourth Canadian Permafrost Conference. — Calgary, Canada, 1982. — P. 181–188. — URL: <https://pubs.aina.ucalgary.ca/cpc/CPC4-560.pdf>. (дата обращения: 18.12.2025).
  13. Осадчий, Г.Б. Солнечная энергия, её производные и технологии их использования (Введение в энергетику возобновляемых источников энергии) / Г.Б. Осадчий. — Омск: ИПК Макшеевой Е.А., 2010. — 572 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009515736>. (дата обращения: 18.12.2025).
  14. Оловин, Б.А. Искусственное оттаивание мерзлых пород теплом солнечной радиации при разработке россыпей / Б.А. Оловин, А.В. Павлов. — Новосибирск: Наука, 1974. — 184 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007315440>. (дата обращения: 18.12.2025).
  15. Самарский, А.А. Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. — Москва: Либроком, 2009. — 350 с. — ISBN 978-5-397-00761-0. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=qjvmav>. — EDN: [QJVMAY](https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=qjvmav). (дата обращения: 18.12.2025).

**Dobrov Eduard Mikhailovich**

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: [accord37@mail.ru](mailto:accord37@mail.ru)

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=312656](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=312656)

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7005947131>

**Golishevskiy Andrei Vyacheslavovich**

State Design, Survey and Research Institute of Civil Aviation "AEROPROJECT", Moscow, Russia

E-mail: [agolishevskiy@yandex.ru](mailto:agolishevskiy@yandex.ru)

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1311892](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1311892)

## Analysis of layer-by-layer excavation methods for thawing soils in permafrost-prone airfield pavement bases

**Abstract.** The authors present an analysis of layer-by-layer excavation technology for thawing permafrost soils in airfield pavement bases in climate zone I (permafrost). The article examines the challenges associated with implementing the classic soft soil replacement method, which requires waiting for the active layer to fully thaw seasonally and then excavating it to its full depth. The limitations of this method for airfield pavement bases are highlighted, including the large volumes of excavation work required, the short construction season typical of climate zone I, and the fact that the active layer reaches its maximum depth at the end of summer.

The article describes an alternative method: layer-by-layer excavation of soil as it naturally thaws under the influence of solar radiation and outside air. The authors present two implementation options for the technology: one with equal thicknesses of the removed layers and one with equal time intervals between thawed soil extractions. To evaluate the effectiveness of the proposed approaches, numerical modeling was conducted in GeoStudio (GeoSlope module) using the Stefan model to account for phase transitions in the soil. Comparative graphs of the thaw front dynamics and development depth are provided, reflecting the dependence of thaw rate and development on the selected technology.

The obtained results demonstrate that the layer-by-layer development method significantly accelerates the achievement of the design depth without the use of artificial heating, while the option with equal layer thicknesses demonstrates better performance in terms of time and material costs.

**Keywords:** thawed layer; frozen soil; Stefan problem; permafrost; excavation; thaw process; active layer