

## ACTIVE LAYER AS INDICATOR OF CONSTRUCTION CONDITIONS AND SECONDARY SOURCE OF ENVIRONMENT POLLUTION

V. S. YAKUPOV

*The active layer impact on construction conditions and dynamics of its development inside a city are discussed. Processes of active layer pollution due to external impact and its development as a secondary source of environment pollution are shown.*

**Рассмотрено влияние сезонноталого слоя и динамики его развития в городской черте на условия строительства и долговечность сооружений. Описаны процессы загрязнения сезонноталого слоя в результате внешних воздействий и образования в нем вторичных источников загрязнения.**

## СЕЗОННОТАЛЫЙ СЛОЙ КАК ИНДИКАТОР УСЛОВИЙ СТРОИТЕЛЬСТВА И ВТОРИЧНЫЙ ИСТОЧНИК ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В. С. ЯКУПОВ

Якутский государственный университет

### ВВЕДЕНИЕ

Сезонноталый слой (СТС) – это оттаивающая сверху летом и вновь промерзающая зимой часть мерзлых горных пород в области распространения вечной мерзлоты [1]. Сезонноталый слой является важным элементом северной среды обитания человека. С ним тесно связано развитие растительных сообществ от накипных лишайников горных тундр, тайги, даже степей до культурных растений. В совокупности с ярко выраженным сезонным кругооборотом вещества и энергии в СТС это привело в свое время к очень удачному его названию – деятельный слой. Естественно, что СТС, являясь поверхностным слоем, наиболее подвержен внешним воздействиям, как естественным, так и связанным с человеческой деятельностью. Его затрагивают любые земляные работы. Полностью или частично СТС служит средой размещения или основанием для самых различных строительных объектов. Здесь значение СТС усиливается различием большинства его свойств в талом и мерзлом состояниях, особенно прочности, и протекающими в нем процессами, прежде всего протаиванием и промерзанием, пучением, просадками, развитием морозобойных трещин. Информация о СТС необходима при строительстве как дорог, трубопроводов, линий связи и электропередач, так и гражданских и промышленных сооружений, при производстве сельскохозяйственных, геологоразведочных, горных, топогеодезических и других работ, для оценки условий проходимости различных транспортных средств и допустимой при этом и других типах воздействий экологической нагрузки.

СТС одним из первых среди компонентов природной среды реагирует на изменения климата и локальных поверхностных условий – подтопление и осушение, пожары, сведение леса, нарушение почвенного слоя, давая иногда начало дремлющим до того нежелательным или даже разрушительным процессам: термокарсту (вытаиванию подземных льдов), солифлюкции (оползням). На него же в первую очередь выпадают из атмосферы и разнообразные загрязняющие вещества.

Одна из общих характеристик СТС – его мощность (толщина) или глубина сезонного протаивания. Мощность зависит от литологического состава и строения, влажности, засоленности, растительного и надпочвенного покрова, положения участка в рельефе, снежного покрова, климатических особенностей. В разные годы она различна, колеблясь около некоторого среднего уровня, возможно возрастающего или убывающего со временем. На участках с пресными надмерзлотными водами глубина сезонного протаивания, возрастая к югу, колеблется от 0,2–0,5 м на заболоченных торфяниках до 5–6 м на лишенных растительности крутых каменистых, обращенных к югу склонах [1]. На участках с засоленными почвами (Центральная Якутия, Забайкалье, Монголия) глубина сезонного протаивания больше, поскольку засоленные надмерзлотные воды оттаивают при температуре ниже 0°C. Понижение температуры таяния (замерзания) прямо пропорционально количеству растворенного вещества. В природных условиях, вне солонцов, это ведет к увеличению глубины сезонного протаивания на 0,7–1,0 м, местами более. Из-за ограниченности объема СТС, подстилаемого водоупорными мерзлыми грунтами, в нем при отсутствии стока, то есть на равнинных участках и в понижениях рельефа, могут накапливаться водорастворимые соединения. Помимо возможных прямых их источников – бытовых и промышленных сточных вод – этому способствуют малое количество осадков и высокий уровень испарения: вода поступает с осадками и испаряется, а содержащиеся в ней, хотя и в небольшом количестве, соли остаются. На лишенных растительности участках этот процесс усиливается за счет большего испарения и диффузии влаги из прилегающих участков и даже без участия сточных вод может привести к образованию незамерзающих таликовых зон, насыщенных высокоминерализованными водами – криопэгами. Летом площадь и общий объем зоны криопэгов возрастают, она расплывается. К зиме зона криопэгов уменьшается в объеме, сохраняя или даже увеличивая общее количество заключенных в ней водорастворимых соединений, которые стоняются в зону криопэгов фронтами промерзания из уже большего объема талых грунтов. Зоны криопэгов могут и блуждать по местности, перемещаясь преимущественно в сторону грунтов с более высокой температурой и меньшей льдистостью, по уклону водоупорного горизонта, и в результате неожиданно возникать в “чистом поле” без всяких видимых на то причин. При благоприятных условиях они могут двигаться непрерывно, быстрее летом и медленнее зимой. Траектории их движения, подобно броуновскому, могут быть весьма своеобразны. Зоны криопэгов перемещаются практически не теряя или даже наращивая массу растворенного в них вещества.

Важной характеристикой СТС является его состав, в особенности распределение

слагающих его частиц по размеру. Оно определяет пористость, удельную поверхность, проницаемость грунтов СТС и другие физические свойства, влияет на влажность, количество и форму распределения в них льда в мерзлом состоянии. Количество влаги в мерзлых грунтах за счет образования только включений льда в виде прослоев разной толщины, длины и ориентации может в несколько раз превосходить их полную влагоемкость при температуре выше 0°C.

### **СЕЗОННОТАЛЫЙ СЛОЙ КАК ИНДИКАТОР УСЛОВИЙ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГРАЖДАНСКИХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Особую роль СТС приобретает в городской черте. Города представляют собой динамичные системы, где кризисные явления развиваются особенно быстро, а вероятность их достаточно велика. Повсеместное нарушение почвенного покрова и гидрологического режима почв вплоть до подтопления низин, повышение температуры почв за счет антропогенного тепла, множество крупных и мелких источников бытовых и промышленных сточных вод, выбросов в атмосферу вредных веществ ведут к росту мощности и влажности СТС, концентрации в нем вредных веществ и засолению надмерзлотных вод. Подсыпка под дороги и здания, производящаяся, как правило, без одновременной прокладки ливневой канализации, ведет к подтоплению старых деревянных зданий и дворов с просадкой грунта и образованием болот и даже мелких водоемов. Увеличение глубины сезонного протаивания может приводить к возникновению и развитию таликов, как правило техногенных, из-за роста засоленности надмерзлотных вод и образования глубоких чаш протаивания под отдельными зданиями, теплотрасами, водоемами, когда глубина сезонного промерзания становится меньше глубины сезонного протаивания. Увеличение глубины сезонного протаивания представляет собой нарушение природного равновесия, ведущее к оживлению криогенных процессов, включая наиболее разрушительные – оползни и, при близком к поверхности залегании подземных льдов, термокарст. Следует отметить возможное при этом разрушение старых кладбищ и скотомогильников, в том числе с захоронениями жертв эпидемий.

Подавляющая часть каменной застройки в северных городах на вечной мерзлоте (Норильск, Якутск) выполняется на свайных фундаментах. Заглубление свай в мерзлый грунт должно быть достаточным для обеспечения их несущей способности для конкретного сооружения. Увеличение глубины сезонного протаивания уменьшает величину этого заглубления и может привести к постепенной, а иногда и быстрой потере несущей способности свай. Другая опасность неуклонно возрастающего засоления надмерзлотных вод – рост их агрессивности, ускоряющий коррозию и разрушение

железобетонных свай. Таким образом, мощность СТС, его влажность и степень засоленности надмерзлотных вод определяют условия строительства, а динамика развития указанных параметров СТС – долговечность зданий и других сооружений.

Для строительства важно знать параметры СТС не только к его началу, но и на проектный срок эксплуатации сооружаемых объектов. При проектировании необходимо ориентироваться либо сразу на прогнозные значения параметров СТС, либо на существующие к началу строительства с тем, чтобы поддерживать их далее стабильными. Изменения параметров СТС могут быть быстрыми, если это связано с подтоплением участка и образованием криопэггов, или даже катастрофическими при перемещении к данному участку уже сформировавшейся зоны криопэггов. Такая блуждающая в городской черте зона криопэггов по скорости и последствиям вызываемых ею кризисных ситуаций может рассматриваться как экологическая бомба.

Таким образом, важны не только общий контроль и прогноз эволюционного изменения параметров СТС, но и выявление и прослеживание развития очагов быстрого их изменения. Наиболее эффективное средство достижения этой цели – использование методов геофизики.

Из-за неблагоприятного развития сезонноталого слоя современное состояние северных городов весьма сложное. В Якутске, например, в аварийном состоянии находятся около 400 зданий. Отмечено и частичное обрушение зданий (рис. 1), обошедшееся, к счастью, без человеческих жертв. О масштабах неблагоприятия говорит, в частности, и то, что здесь ежегодно весной из-за морозобойных трещин выходило из строя около половины городской телефонной сети, кабели которой проложены в СТС.



**Рис. 1.** Типичный пример частичного обрушения кирпичных и блочных зданий (г. Якутск; фото М.Н. Григорьева)

## ЗАГРЯЗНЕНИЕ СЕЗОННОТАЛОГО СЛОЯ

Сезонноталый слой, как и другие поверхностные образования, подвержен загрязнению веществами, выпадающими с осадками и без них из атмосферы. Малая емкость и сезонность существования СТС в талом виде способствуют консервации и накоплению загрязняющих веществ вплоть до концентраций, при которых данный участок СТС становится опасным вторичным источником загрязнения атмосферы, почв, подземных и поверхностных вод. Загрязнение распространяется подземными водными потоками и пылью из иссушенного поверхностного слоя в период отсутствия дождей. Сопутствующее локальное перераспределение загрязняющих веществ в СТС создает новые участки их высокой концентрации, которые также оказываются подвижными. Из-за ограниченности объема СТС и времени его существования в талом состоянии процессы самоочищения в нем замедлены или вовсе подавлены.

Рассмотрим планетарные, региональные и местные механизмы загрязнения сезонноталого слоя, естественные и антропогенные. К числу естественных, планетарных и региональных относятся продукты вулканических извержений наиболее активных и длительно действующих вулканов. Среди продуктов извержений следует различать инертный вулканический пепел и основания кислот: угольной, сернистой, серной, соляной и др. [2]. Пути переноса и области осаждения частиц, попавших в атмосферу, могут быть различными. Основная их часть, вносящая наибольшие изменения в окружающую среду, выпадает в окрестностях вулкана, иногда на удалении в сотни и даже более тысячи километров. Другая, меньшая часть переносится в тропосфере, то есть на высоте менее 10 км, на значительно большие расстояния в соответствии с общими законами атмосферной циркуляции: в северном полушарии преимущественно с запада на восток, дорогой циклонов. Наконец, третья, наименьшая часть попадает в стратосферу и стратосферными ветрами разносится над поверхностью земли. Доля газов в этих группах вулканических частиц возрастает в порядке перечисления. Они вызывают кислотные дожди и потому могут представлять значительную экологическую опасность. После извержения вулкана Катмай на Аляске в 1912 году выпавшие в Чикаго кислотные дожди испортили сушившееся на веревках белье – так велика была концентрация соляной кислоты в дождевой воде. Понятно, что это исключительный случай. Однако общая масса выброшенного за 10 лет вулканом Катмай хлора превышает миллион тонн. Поэтому в отдельных районах с наибольшей концентрацией и повторяемостью кислотных дождей вулканического происхождения растительность, несомненно, испытывает их угнетающее действие. Наиболее велика роль сернистых соединений, которые в результате фотохимических

реакций переходят в серную кислоту. В итоге образуется стратосферный слой сернокислотного аэрозоля.

СТС на ледниках в результате выпадения снега обновляется. Следы кислотных дождей в нем постепенно отступают в глубь ледника. Они могут быть обнаружены химическим анализом образцов льда из скважин, но Хаммер (см. [2]) указал для этого более эффективный способ. Он использовал то обстоятельство, что ничтожное количество примесей, особенно кислот, повышает электропроводность льда на несколько порядков. Оказалось, что, несмотря на диффузное рассеяние этих примесей во льду, периоды активизации вулканической деятельности могут быть выделены по увеличению электропроводности льда в соответствующих по времени образования слоях ледника.

Изучение таким же образом территорий выпадения кислотных дождей требует бурения довольно большого числа скважин. Однако обнаружено, что электропроводность льда Гренландского ледникового щита, ледников Канадского архипелага примерно на два порядка больше электропроводности льда альпийских, кавказских и тьянь-шаньских ледников. Очевидно, что столь высокая проводимость льда указанных ледников может быть обусловлена лишь привносом вещества со стороны. Источник привноса для обеспечения аномальной проводимости толщи льда в сотни метров мощностью должен быть относительно постоянно действующим, пусть импульсами. Его действие должно проявляться на значительной территории, хотя масса привноса может быть незначительной. Этим условиям удовлетворяют кислотные дожди вулканического происхождения, поставляющие как протоны, вклад которых в увеличение проводимости льда наиболее значителен, так и отрицательно заряженные ионы. Принимая гипотезу, следует предположить, что в области воздействия определенной группы вулканов проводимость льда ледников характеризует масштабы их деятельности в форме кислотных дождей за большие периоды времени, "консервируя" их результаты. Расположение и размеры территорий с аномально высокой проводимостью льда, в том числе на разных глубинах, должны отражать масштабы извержений в отдельные периоды и, возможно, тенденции изменения или многолетние вариации атмосферной циркуляции. Схемы общей атмосферной циркуляции позволяют предположить, что увеличение проводимости льда ледников Канадского архипелага и Гренландии обязано деятельности вулканов Камчатки, Алеутских островов и Аляски, а также Исландии. Отметим, что в северном полушарии большая часть продуктов извержения выпадает или попадает в стратосферу к северу от вулкана. Возможно, это и объясняет, что альпийские ледники не испытали следствий кислотных дождей вулканического происхождения в такой степени, как ледники, находящиеся в полярной об-

ласти. Быстрое изучение распределения проводимости льда ледников в плане и, возможно, местами и в вертикальном разрезе без бурения скважин может быть выполнено воздушными и наземными методами электроразведки.

Итак, стратосферный слой сернокислотного аэрозоля, углекислый газ и кислотные дожди вулканического происхождения, вызывая планетарные и локальные внутриклиматические изменения, могут быть причиной вариаций глубины сезонного протаивания, изменения геохимии СТС, в частности проводимости льда, и угнетения, возможно избирательного, растительных сообществ. Аналогичный вклад на локальном, региональном и даже планетарном уровнях вносят выбросы вредных веществ в атмосферу промышленных производств. Например, Норильский промышленный узел ежегодно выбрасывает в атмосферу ~2 млн т двуокиси серы и ~60 тыс. т хлора. Напомним, что вулкан Катмай ежегодно выбрасывает в атмосферу ~100 тыс. т хлора.

Антропогенное загрязнение СТС подобного характера распространения (планетарного, регионального и локального) связано с атомными взрывами и авариями. И здесь наибольшей опасности подвергаются ближайшие к источнику радиоактивного заражения участки и след радиоактивных облаков, разносимых ветрами. Существенно, что рассеяние радиоактивных веществ в СТС ограничено его объемом, поэтому падение их концентрации со временем происходит медленнее, чем вне области распространения вечной мерзлоты. Исключение составляют населенные пункты, дороги, пашни. Здесь радиоактивные вещества с пылью попадают в воздух, переносятся ветрами и вновь выпадают, меняя свое первоначальное распределение на дневной поверхности. Сохранению радиоактивного заражения способствует накопление некоторых радионуклидов растениями, например стронция-90 ягелем.

Значительное, хотя и локальное перераспределение радиоактивных веществ возможно из-за лесных и тундровых пожаров, продукты сгорания которых уносят накопленные в растениях вещества. Пожары, возникающие из-за гроз (отмечалось до 50 возгораний в день вдоль границы надвигающейся массы холодного воздуха) и по неосторожности человека, местами охватывают значительные площади. Они нередко повторяются в пределах конкретного региона. Пожары вызывают заметное, сказывающееся десятилетиями изменение глубины сезонного протаивания из-за уничтожения растительного покрова, восстановление которого требует длительного времени и не полностью обратимо. Увеличение сезонного протаивания при благоприятных для этого условиях может привести к термокарсту.

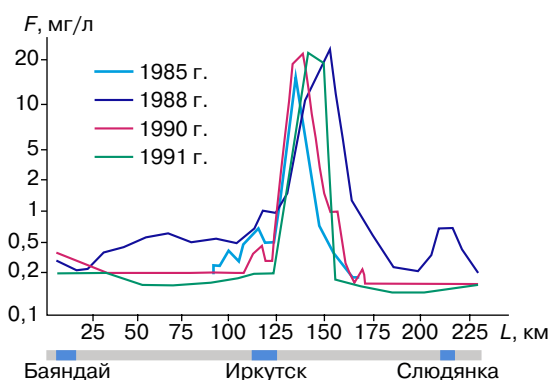
Регионального уровня нередко достигает и загрязнение сезонноталого слоя углеводородами в результате аварий нефтепроводов, нефтехранилищ и пр. Рассеяние углеводородов происходит через

поверхностные воды и по воздуху и поэтому может захватывать значительные территории. Их окисление в СТС приводит к весьма значительному увеличению его мощности над залежами углеводородов.

Среди рассмотренных выше процессов есть такие, которые должны приводить к увеличению мощности сезонноталого слоя и изменению его геохимических особенностей на больших территориях. Однако пункты систематических наблюдений за глубиной сезонного протаивания редки, а ряды наблюдений в них слишком коротки, чтобы на общем фоне вариаций мощности СТС надежно выделить те из них, которые нас интересуют.

## СЕЗОННОТАЛЫЙ СЛОЙ КАК АККУМУЛЯТОР И ВТОРИЧНЫЙ ИСТОЧНИК ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Наиболее опасными источниками антропогенного загрязнения окружающей среды являются населенные пункты (пропорционально их размерам). В качестве примера образования и накопления загрязняющих веществ в городской черте приведем данные о содержании фтора в снежном покрове по профилю с. Баяндай – г. Иркутск – г. Слюдянка (рис. 2). На рис. 2 видно, что содержание фтора вблизи Иркутска приблизительно в 100 раз выше фоновых значений (смещение максимума кривой содержания фтора относительно Иркутска вызвано господствующими ветрами западных румбов). Особые черты влиянию городов на загрязнение окружающей среды придают характер развитой в них промышленности, доля в ней вредных производств и особенности климата. В области распространения вечной мерзлоты при прочих равных условиях город намного более опасен для окружающей среды. С одной стороны, те же многочисленные источники загрязнения: свалки и автодороги, многочисленные утечки бытовых и промышленных сточных вод, выбросы вредных веществ в атмосферу, с другой –



**Рис. 2.** Содержание фтора  $F$  в снежном покрове по профилю с. Баяндай – г. Иркутск – г. Слюдянка в 1985–1991 гг. (см. [3])

повсеместное нарушение не только почвенного покрова, но и поверхностных условий в целом. Нельзя не отметить, что большинство северных городов связано с вредными производствами – добычей и переработкой полезных ископаемых. Эта совокупность причин ведет к увеличению мощности СТС и, следовательно, его емкости как вместилища и аккумулятора загрязняющих веществ.

Накоплению загрязняющих веществ в СТС способствуют также незначительные возможности их рассеяния: в земной среде из-за ограничения кругооборота вещества СТС, в атмосфере (в Восточной Сибири) из-за штилевой погоды и повышения зимой с высотой температуры воздуха, препятствующих воздушному обмену. В результате на отдельных участках концентрация растворимых веществ в надмерзлотных водах может достигать высоких значений (на территории Якутска – до 300 г/л). Будем называть такие участки вторичными источниками загрязнения. Из СТС загрязнение распространяется подземными водными потоками, захватывая новые участки СТС, подземные и поверхностные воды, и через атмосферу пылью из поверхностного слоя иссушения (зоны аэрации). В результате происходит перераспределение вредных веществ в СТС и создание новых вторичных источников загрязнения, которые, таким образом, оказываются подвижными. Особенно подвижны загрязняющие вещества, содержащиеся в пыли: тяжелые металлы, радиоактивные, токсичные и прочие вещества. Нерастворимая их часть накапливается в самой верхней части почвенного покрова, которая подвержена иссушению в периоды между дождями и служит источником пыли. С пылью загрязняющие вещества легко попадают в дыхательные органы, что особенно опасно.

Таким образом, на Севере в городской черте благодаря наличию множества разного рода источников загрязнения, превышению испарения над годовой суммой осадков, плохому стоку, свойствам самого СТС происходит накопление загрязняющих веществ в СТС с увеличением его емкости как вместилища и накопителя и образованием подвижных вторичных источников загрязнения, нередко очень высокой концентрации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сезонноталый слой – наиболее чувствительный к внешнему воздействию компонент толщи мерзлых горных пород как части экосистемы. Внешнее воздействие, первоначально большей частью в виде привноса вещества, планетарное, региональное или локальное, находит отражение в изменениях различных параметров СТС. Изменения параметров СТС носят консервативный характер, время их существования, как правило, много дольше времени воздействия. Большой частью они необратимы. В городской черте по совокупности причин, связанных

с изменениями поверхностных условий, привносом вещества извне и ухудшением поверхностного стока, увеличиваются глубина сезонного протаивания, влажность и засоленность грунтов сезонного слоя.

Мощность и влажность СТС определяют условия строительства, а их динамика во времени и растущая степень коррозионной агрессивности надмерзлотных вод — долговечность уже построенных сооружений.

В СТС, в особенности на равнинных участках и в понижениях рельефа, вследствие ограничения кругооборота веществ объемом СТС, угнетения в нем процессов самоочищения, превышения испарения над суммой годовых осадков выявлена тенденция к накоплению загрязняющих веществ. В городской черте из-за привноса бытовых и промышленных отходов эта тенденция резко усиливается и в СТС образуются вторичные источники загрязнения атмосферы, почв, подземных и поверхностных вод. Эти источники могут перемещаться, а также давать начало новым источникам в результате переноса загрязняющих веществ пылью и подземными водными потоками.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Общее мерзлотоведение. Новосибирск: Наука, 1974. 291 с.
2. Вулканы, стратосферный аэрозоль и климат Земли. СПб.: Гидрометеониздат, 1986. 256 с.
3. *Вахромеев Г.С.* Экологическая геофизика. Иркутск, 1995. 213 с.

\* \* \*

Виль Сайдельевич Якупов, доктор геолого-минералогических наук, профессор Якутского государственного университета, заслуженный деятель науки РФ, действительный член Российской академии естественных наук и Нью-Йоркской академии наук. Награжден медалью П.Л. Капицы. Основные области научных интересов: исследование вечной мерзлоты методами геофизики, разведочная геофизика, петрофизика. Автор и соавтор более 200 публикаций, в том числе пяти монографий.