

## К ПРОБЛЕМЕ ОЦЕНКИ КОРРОЗИОННОЙ АКТИВНОСТИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ КРИОЛИТОЗОНЫ

М.А. Великоцкий, С.А. Егурцов\*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т,  
119991, Москва, Воробьевы горы, Россия, velikotskij@mail.ru  
\*ОАО "Газпром", ООО "Газпромэнергодиагностика",  
117218, Москва, ул. Кржижановского, 21/33, Россия, mosged@dol.ru

Коррозия металлов в подземных условиях наносит огромный материальный ущерб трубопроводному транспорту и экологии окружающей среды. В криолитозоне уложены десятки тысяч километров труб газо- и нефтепроводов. Однако до сих пор коррозионная активность грунтов криолитозоны недостаточно обоснована. Надежных критериев для оценки коррозионной активности грунтов криолитозоны нет. В статье приводятся данные о высокой скорости глубинной коррозии металлов труб в грунтах криолитозоны и в грунтах лесной и степной зон. Сделаны выводы о высокой коррозионной агрессивности грунтов криолитозоны, причиной которой являются транспортировка теплого газа и высокое содержание протонов водорода в поровых растворах грунтов.

*Коррозионная активность грунтов, криолитозона, пленка незамерзшей воды, химический состав поровой воды, электрохимическая коррозия, глубина коррозионных язв, скорость коррозии металла*

### PROBLEM OF ESTIMATION OF FROZEN DISPERSED GROUND CORROSION ACTIVITY IN CRYOLITHOZONE

M.A. Velikotskij, S.A. Egurtsov\*

Lomonosov Moscow State University, Department of Geography,  
119991, Moscow, Vorobyovy Gory, Russia, velikotskij@mail.ru  
\*OAO "Gasprom", OOO "Gaspromenergoagnostika",  
117218, Moscow, Krzhizhanovsky str., 21/33, Russia, mosged@dol.ru

Corrosion of metals in ground causes huge material damage to pipeline transport and ecology. There are tens of thousand kilometers of gas and oil pipelines in cryolithozone. However, ground corrosion activity in cryolithozone has not been well-founded yet. There are no reliable criteria for estimating ground corrosion activity in cryolithozone. In the article we adduce data about the high rate of depth corrosion of pipelines in the ground of cryolithozone, wood and steppe zones. We have come to a conclusion that high ground corrosion aggression in cryolithozone occurs due to the transportation of warm gas and the high content of hydrogen protons in ground porous solutions.

*Ground corrosion activity, cryolithozone, film of unfrozen water, chemical composition of porous water, electrochemical corrosion, depth of corrosion pits, corrosion rate in metal*

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время использование железа в наземных, подземных и подводных сооружениях достигло грандиозных размеров. По данным В.В. Добровольского [1984], за историческое время было извлечено из недр 20 млрд т железа, из которых 14 млрд т рассеялось по поверхности суши, т. е. уничтожено коррозией. Особенно большие потери металла наблюдаются в трубопроводном транспорте. Кроме огромных потерь человеческого труда, затраченного на производство железа, коррозия в трубопроводном транспорте является главной причиной их разгерметизации. Разлившиеся нефтепродукты на долгие годы загрязняют почвы, грунты и подземные воды, становятся причиной тяжелых заболеваний. Внезапные утечки газа сопровождаются взрывами, пожарами и прочими социальными катастрофами. По данным ОАО "Газпром" за

1999–2001 гг. главной причиной отказов (41 % всех случаев) на магистральных газопроводах была наружная коррозия металлов.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Современная наука о коррозии и защите металлов создана на основе таких наук, как физическая химия, электрохимия и металловедение. Теория коррозии металлов создавалась в лабораторных условиях, в "пробирках", а в природных условиях проверялась в различных регионах земного шара, и здесь не последняя роль в разработке теории коррозии принадлежит геологии и географии.

В естественных (природных) условиях коррозия металлов происходит в воздухе (атмосфере), воде (пресной и соленой) и в подземных условиях.

Географическая проблема коррозии металлов обозначилась в начале XX в., когда Американское бюро стандартов проводило широкомасштабные исследования коррозии металлов в различных грунтах США [Акимов, 1945]. В землю закапывались большие партии образцов различных металлов, которые извлекались через 10–12 лет. Образцы взвешивались перед испытанием и после испытаний. Затем определялась глубина коррозионных язв на поверхности металлов. В ходе исследований выполнялись анализы физико-химических свойств грунтов и проводились многолетние наблюдения за ходом метеоэлементов. В результате опытов выяснилось, что скорость коррозии различных марок стали и чугуна оказалась одинаковой в однотипных грунтах. Было установлено, что скорость коррозии черных металлов не зависит от их сорта, а зависит только от коррозионной активности грунтов. После этого во всем мире начался активный поиск критериев оценки коррозионной активности грунтов. Сразу были установлены отдельные факторы, предопределяющие повышенную коррозионную активность грунтов, например, высокие концентрации NaCl в обводненных грунтах на побережье Южной Калифорнии или подзолистые почвы в таежной зоне [Улиг, 1968]. Затем в ходе работ было выявлено, что на скорость коррозии металлов в грунтах (прямо или косвенно) влияют: гранулометрический состав, влажность, воздухопроницаемость и электропроводность грунтов, показатель концентрации водородных ионов (рН), величина окислительно-восстановительного потенциала (еН или ОВП), концентрация и химический состав поровых растворов, содержание газов и органического вещества в грунтах, мерзлое или талое состояние грунтов, температура и различные продукты жизнедеятельности микроорганизмов. Установлено, что один и тот же фактор при различных сочетаниях с другими может в одних случаях ускорять, в других – замедлять скорость коррозии металлов, и что оценка коррозионной активности среды по какому-либо одному фактору невозможна. Однако объединить вышеперечисленные факторы по географическому признаку технически образованные ученые не пытались, а географы этой проблемой практически не занимались.

В СССР первые исследования по оценке коррозионной активности грунтов были проведены в южных регионах в связи со строительством и эксплуатацией нефте- и газопроводов в Прикаспийской низменности и на юге Украины [Притула, 1934; Францевич и др., 1948; Негреев, Аллахвердиев, 1953].

Сопоставив данные анализов водных вытяжек грунтов по нефтепроводу Баку–Батуми с состоянием поверхности трубопровода, В.А. Притула [1934] пришел к выводу, что содержание хлор-ионов и сульфат-ионов более 0,1 % является надежным

критерием высокой коррозионной активности грунтов. Тесную зависимость между содержанием хлор-ионов (Cl<sup>-</sup>) и сульфат-ионов (SO<sub>4</sub><sup>-</sup>) в водных вытяжках почв и глубиной коррозии труб подтвердил А.И. Перельман [Негреев, Аллахвердиев, 1953].

На основе статистической обработки числа случаев проржавлений труб, эксплуатировавшихся с 1930 по 1940 г., В.А. Притула установил, что большинство этих случаев произошло в почвах с низким омическим сопротивлением (менее 10 Ом·м) и предложил первую классификацию (градацию) коррозионной активности почв по удельному электрическому сопротивлению почв [Притула, 1934]. Работы по оценке коррозионной активности грунтов, проведенные на юге СССР (в зоне полупустынь и степей), показали, что их поровые растворы имеют повышенное содержание хлор-ионов и сульфат-ионов и очень низкое удельное электрическое сопротивление. Эти критерии оценки коррозионной активности грунтов были заложены в различные справочники и утверждены стандартами и руководствами в СССР в 50-е гг. XX в., они дошли без изменения до наших дней.

По мере продвижения трубопроводного транспорта на север все острее становился вопрос об оценке коррозионной активности грунтов криолитозоны. Критерии оценки коррозионной активности грунтов южных районов не распространяются на многолетнемерзлые породы. Например, ГОСТ Р 51164-98 [1998] не распространяется на трубопроводы, уложенные в многолетнемерзлых грунтах. Точно так же и ГОСТ 9.602-89 [1989] не распространяется на металлические сооружения, расположенные в многолетнемерзлых породах. Причиной этого ограничения является высокое удельное электрическое сопротивление (несколько тысяч Ом·м) многолетнемерзлых грунтов криолитозоны. Согласно регламенту указанных ГОСТов, грунты с высоким удельным электрическим сопротивлением относятся к коррозионно-неопасным. Мнение о том, что многолетнемерзлые грунты являются коррозионно-неактивными, твердо укрепились в науке, а регламенты вышеназванных ГОСТов позволили строить шлейфы и межпромысловые коллекторы на газовых месторождениях севера Тюменской области без средств электрохимической защиты (ЭХЗ).

По-видимому, не последнюю роль в утверждении такой точки зрения сыграли работы геохимиков. Например, А.А. Сауков [1951] писал, что на основе теории Вант-Гоффа–Оствальда при температуре около 0 °С, соответствующей переходу воды из жидкого состояния в твердое, происходит скачкообразное изменение скорости реакций: природные химические реакции в этом случае бесконечно замедляются. Зона вечной мерзлоты в этом смысле является зоной химического покоя.

Аналогичное мнение высказал Н.М. Страхов [1960]: согласно закону Вант-Гоффа–Оствальда скорость химических реакций с понижением температуры на 10 °С уменьшается вдвое, поэтому можно утверждать, что низкие температуры среды в полярных районах вызывают резкое подавление химических процессов.

В это же время Н.Д. Томашов [1959] отмечал, что влияние отрицательной температуры на скорость коррозионного процесса не исследовано. Можно ожидать резкое повышение скорости коррозионного процесса при оттаивании грунтов и резкое замедление ее при промерзании почвенной влаги. Ускоряют коррозию металла в почве и суточные колебания температур, особенно при замерзании и оттаивании. Но это явление не исследовано. Однако, если сравнивать коррозионную активность почв Крайнего Севера, находящихся большую часть времени в мерзлом состоянии, и почв низких широт, постоянно талых, можно считать температуру главным фактором коррозии.

В литературе утвердилось мнение о том, что химические реакции на Крайнем Севере чрезвычайно замедлены из-за слабой диссоциации воды при низких температурах. Однако, по мнению И.А. Тютюнова [1961], в этих рассуждениях упускается то обстоятельство, что концентрация водородных ионов здесь может восполняться за счет повышенного растворения углекислоты при понижении температуры и повышенной ее диссоциации под давлением, которое она испытывает в тонких водных пленках незамерзшей воды.

Работами последних лет убедительно доказано, что криолитозона не является зоной химического покоя, в ней активны процессы химического и биохимического выветривания, миграции и новообразования веществ.

Основными факторами окислительно-восстановительных реакций являются незамерзшая вода, атомарный кислород и водород, углекислота и рН среды, определяемая ионами водорода ( $H^+$ ) и гидроксидом ( $OH^-$ ).

Известно, что мерзлые грунты состоят из минерального скелета, льда, незамерзшей (пленочной) воды и различных газов. В пленочной воде концентрируются ионы растворенных солей, кислот и растворенные газы. В пленке незамерзшей воды происходит диффузия ионов, в результате которой идет выравнивание концентраций растворенных веществ [Ершов, 1986].

При понижении температуры в пленке незамерзшей воды увеличивается количество растворенной углекислоты и кислорода. Кроме того, при возрастании концентрации растворенных солей в пленочной воде нарушается равновесие в системе вода–лед и происходит подплавление льда, сопровождающееся увеличением толщины пленки незамерзшей воды. Таким образом, химические реак-

ции в многолетнемерзлых породах не затухают из-за наличия пленки незамерзшей воды.

Выше отмечалось, что при замерзании грунтов в пленке незамерзшей воды резко увеличивается концентрация водородных ионов за счет повышенного растворения углекислого газа, образования углекислоты и ее диссоциации под давлением на ионы водорода и кислотный остаток, в результате чего пленочная вода по своей агрессивности приближается к кислотам [Тютюнов, 1961]. Многие исследователи отмечают также, что повышению концентрации водородных ионов помимо низкой температуры в криолитозоне способствует высокое содержание органического вещества. По расчетам С.Л. Шварцева [1978], в тундре ионный состав грунтовых вод формируется на 62,5 % за счет разложения растительных остатков, в тропиках – на 88,6 %, в лесостепи – на 42,6 %, в степях – лишь на 16,2 %. Высокое содержание растворенных органических веществ способствует образованию [Ершов, 1986] весьма агрессивной формы гумуса – фульвокислоты, которая разрушает окислы, образует различные органоминеральные соединения (оксалаты, хелаты, фульваты) и по сравнению с гуминовыми кислотами более агрессивна к металлам. Содержание фульвокислот здесь в 5–6 раз выше, чем гуминовых кислот, поэтому коррозионная активность почв и грунтов криолитозоны значительно выше, чем почв и грунтов черноземных степей.

Содержание водородных ионов (рН ниже 4) в грунтах криолитозоны в сотни раз выше, чем в грунтах зон степей и пустынь. Низкое значение рН и высокое содержание в грунтовых водах органического вещества обуславливают повышенное количество растворенного железа, миграция которого в 10–1000 раз больше, чем в немерзлотных ландшафтах.

Содержание железа в реках заболоченных равнин криолитозоны Западной Сибири достигает 10–14 мг/л, в то время как в реках гумидной зоны содержание железа в пределах 0,57 мг/л [Страхов, 1960].

Следует обратить внимание еще на один фактор, определяющий высокую коррозионную активность грунтов в криолитозоне, – последовательное вымерзание солей при понижении температуры и увеличение концентрации растворов за счет хлоридов. Как известно [Зубов, 1938], в процессе замерзания морской воды при температуре  $-1,9^\circ C$  выпадает в осадок  $CaCO_3$ , при температуре  $-8,2^\circ C$  – глауберова соль ( $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ ) и в растворе остаются только хлориды ( $NaCl \cdot 2H_2O$ ,  $MgCl_2 \cdot 12H_2O$ ,  $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ ).

По мнению Ю.Р. Эванса [1962], присутствие в морской воде ионов кальция является основной причиной того, что она менее коррозионно-активна, чем простой раствор хлористого натрия. В связи с этим выпадение ионов кальция в осадок при про-

мерзании поровых растворов грунтов и увеличение концентрации хлоридов будут способствовать активному разрушению оксидных пленок и ускорению коррозии металлов в промерзающих грунтах.

Таким образом, коррозионная активность мерзлых грунтов криолитозоны обусловлена количеством незамерзшей воды, концентрацией в ней ионов водорода, углекислоты и растворенных органических веществ.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Еще в 1950-е гг. Н.Д. Томашов [1959] писал, что для разработки более эффективных мер защиты трубопроводов от подземной коррозии необходимо детальное изучение механизма подземной коррозии и построение общей теории подземной коррозии металлов. В настоящее время электрохимическая теория коррозии железа в почвах и талых грунтах разработана достаточно подробно, но по многим вопросам нет единого мнения, как нет и надежных критериев для оценки коррозионной агрессивности грунтов.

Особенно слабо разработана теория коррозии металлов в промерзающих—оттаивающих и многолетнемерзлых грунтах.

А.И. Перельман [1966], характеризуя почвы и грунтовые воды тундровой зоны, отмечал, что в тундре разложение растительных остатков замедлено, в почвах преобладают анаэробные условия, образуются фульвокислоты. Показатель водородных ионов рН достигает 4. В таких условиях весьма подвижно двухвалентное железо. Грунтовые воды слабо минерализованы, имеют кислую реакцию и содержат большое количество растворимых органических веществ. Низкая температура обуславливает высокую растворимость газов и значительное количество растворенных газов в воде. Типоморфным элементом является водородный ион. В грунтах на периодически затапливаемых морских побережьях тундры отмечается повышенное содержание хлор-иона.

А.Г. Акимов [1945], оценивая коррозионную активность кислых почв, писал, что при повышенной кислотности затрудняется образование защитных пленок, и она становится менее стойкой. Ряд исследователей [Францевич и др., 1948; Томашев, 1959] также считают, что при низком значении рН этот показатель служит надежным критерием для оценки высокой коррозионной активности грунтов.

Оценивая коррозионную активность мерзлых грунтов с точки зрения электрохимической теории, можно отметить главное условие для активного протекания коррозионного процесса: наличие жидкой фазы – электролита (незамерзшей воды) с большим количеством ионов водорода и повышенным количеством растворенного кислорода.

Н.Д. Томашов [1959] отмечал, что в кислых почвах увеличению скорости коррозии металлов будет способствовать процесс водородной деполяризации, т. е. восстановление протонов водорода на катодах. Восстановление протонов водорода связано с разрядкой валентных электронов на катоде, что согласно электрохимической теории приводит к образованию в растворе новых ионов железа и их окислению с гидроксидными. Таким образом, протон водорода в криолитозоне не только способствует разрушению окисных пленок на поверхности металла, но и непосредственно участвует в восстановительном акте окислительно-восстановительного процесса коррозии металлов.

Все вышесказанное свидетельствует о высокой коррозионной активности почв тундровой и таежной зон.

Все рассуждения о влиянии растворенных ионов, кислотности или щелочности поровых растворов, электропроводности среды, окислительно-восстановительного потенциала или бактерий на коррозионную агрессивность грунтов беспочвенны, если нет анализа коррозионных форм на поверхности металла, прямых показателей коррозионной активности грунтов. Зная глубину коррозионных язв и время, за которое они образовались на поверхности металла, можно вычислить скорость коррозии в мм/год. По скорости образования коррозионных язв на поверхности металла можно судить о степени коррозионной агрессивности среды, т. е. о коррозионной активности грунтов.

На практике (еще в 30-е гг. XX в.) коррозионную активность грунтов оценивали по скорости прорывания труб или по скорости образования первого сквозного “питтинга”, приводящего к разгерметизации труб. Эта методика принята нами для прямой оценки коррозионной активности грунтов тундровой, лесной и степной зон России.

Вначале на поверхности трубопроводов определялась глубина коррозионных язв. По времени укладки труб вычислялось время их образования. Разделив глубину коррозионных язв на время пребывания труб в земле, можно получить приблизительную скорость глубинной коррозии металлов, которая является главным критерием оценки коррозионной активности грунтов. В местах исследования коррозионных повреждений определялись также различные физико-химические показатели грунтов, количественное содержание которых затем сравнивалось со скоростью глубинного проникновения коррозионных язв. На этом основании делались выводы о коррозионной активности грунтов. Здесь также следует отметить, что наблюдаемые скорости коррозии (0,05–0,50 мм/год) выявлены в условиях действующей электрохимической защиты трубопроводов. ЭХЗ представляет собой специальную электрическую станцию для подачи на трубопровод катодного поляризационного потенциала

до уровня 0,85 В, в результате чего скорость коррозии труб снижается практически до нуля. Однако по различным причинам (плохая изоляция труб, высокое электрическое сопротивление грунтов, снижение поляризационного потенциала и пр.) около 5 % поверхности труб остаются незащищенными. На этих незащищенных участках обычно и происходит коррозионное повреждение трубопроводов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

ООО «Газпромэнергодиагностика» более пяти лет занимается электрометрическим и коррозионным обследованием подземных газопроводов в различных регионах России. Один из авторов статьи исследовал при этом физико-химические свойства грунтов и их коррозионную активность.

Ниже приводится характеристика коррозионной активности грунтов различных географических зон России и криолитозоны (таблица).

Северо-Ставропольская станция подземного хранения газа (СПХГ) расположена в южной части степной черноземной зоны с мощным гумусовым горизонтом, залегающим на плиоценовых карбонатных глинах и ракушечниковых известняках. Елшанская, Песчано-Уметская и Степновская станции подземного хранения газа расположены в окрестностях г. Саратова, на севере черноземной зоны с лесостепной растительностью. Пунгинская СПХГ расположена в Тюменской области в таежно-болотной зоне хвойных лесов с мощным подзолообразованием. Газовое месторождение Медвежье находится на севере Тюменской области в долине р. Ныда, в зоне сплошного распространения ММП с тундровой и лесотундровой растительностью на торфяно-глебовых почвах.

Как следует из таблицы, скорость коррозии железа на трубопроводах-шлейфах перечисленных СПХГ и внутрипромысловом коллекторе изменяется от 0–0,05 до 0,1–0,4 мм/год.

**Грунты Северо-Ставропольской СПХГ** представлены тяжелыми карбонатными суглинками с небольшой влажностью (8,7–14,4 %), очень высоким содержанием ионов-хлора (0,1–0,18 мг-экв./100 г) и характеризуются щелочными условиями поровых растворов (рН–8,15–9,0). Из-за высокого содержания хлоридов они должны иметь очень высокий показатель коррозионной активности. Однако, как мы видим, скорости коррозии в таких грунтах едва достигают 0,1 мм/год. Причиной относительно слабой коррозионной активности грунтов является нейтрализация хлоридов ионами кальция, которые являются ингибиторами коррозии. Присутствие ионов кальция способствует образованию на поверхности трубопроводов плотной нерастворимой корочки из карбоната кальция (CaCO<sub>3</sub>). Эта короч-

ка кроме кальцита включает также магнетит (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), сульфид железа (FeS), гипс (CaSO<sub>4</sub>·nH<sub>2</sub>O), доломит (CaCO<sub>3</sub>·MgCO<sub>3</sub>), соду (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), углекислый магний (MgCO<sub>3</sub>), сернокислый магний (MgSO<sub>4</sub>) и окись кремния (SiO<sub>2</sub>) как цементирующий материал. В большинстве случаев там, где отмечается налет карбонатной пленки, коррозия отсутствует.

По мнению Г.В. Акимова [1945], в щелочных растворах скорость коррозии снижается действием кислорода как ингибитора, и часто даже незначительное количество кислорода почти полностью прекращает коррозионный процесс. В жесткой воде, особенно в области распространения доломитовых пород, присутствие кислорода способствует образованию защитной карбонатной пленки. Н.Д. Томашов [1959] также подтверждает, что при обычной температуре железо довольно устойчиво в щелочах. Практически коррозия железа прекращается при доступе кислорода и рН выше 9,5. Кроме того, высокие значения рН, очевидно, препятствуют жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий.

Таким образом, грунты сухой степной зоны, несмотря на высокую минерализацию их поровых растворов и высокое содержание хлор-ионов, в целом можно отнести к грунтам со средней коррозионной агрессивностью. Причиной этого являются хорошая аэрация грунтов, высокое содержание ионов Ca<sup>++</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> и образование карбонатной пленки.

**Грунты лесостепной зоны Елшанской, Песчано-Уметской и Степновской СПХГ** отличаются от вышеописанных низким содержанием хлоридов, достаточно высоким удельным электрическим сопротивлением грунтов, высокими значениями рН, ОВП и показателя Кларка (rH<sub>2</sub>). Последний представляет собой условную величину и вычисляется по формуле  $rH_2 = Eh/30 + 2pH$ . Этот показатель характеризует концентрацию молекулярного водорода в грунтах. При значениях rH<sub>2</sub> выше 27 в грунтах преобладают окислительные процессы, ниже 27 – восстановительные.

Согласно нормативным документам описанные выше грунты относятся к коррозионно-неактивным. Однако скорость коррозии металла здесь очень высокая. На перечисленных СПХГ отмечено семь участков, где скорость коррозии металла достигает 0,1–0,5 мм/год. По данным лаборатории ЭХЗ НПО Нефтегазкомплекс (Саратов, 2001 г.), на коллекторах ГРП-1 и ГРП-3, где защитный потенциал ниже 0,48 В обнаружены раковины глубиной 8–10 мм, а скорость глубинной коррозии составила 0,37 мм/год.

Объяснить высокую скорость коррозии исследованных грунтов довольно сложно. Объяснение можно дать лишь на качественном уровне. Исследуемые грунты не отличаются от предыдущих

Скорость коррозии металлов и физико-химические характеристики грунтов

Номер скважины	Глубина коррозии (мм)/ скорость коррозии (мм/год)	Название грунта	Влажность (%)	Содержание (мг-экв./100 г)					Водородный показатель рН	Уд. электр. сопротивление (Ом·м)	Окисл.-восст. потенциал (мВ)	Показатель Кларка $H_2$	Коррозионная активность грунтов	
				Na+K	Ca	Mg	Cl	SO <sub>4</sub>						HCO <sub>3</sub>
<i>Газовое месторождение Медвежье</i>														
1-12	2,0/0,06	Супесь	24	0,017	0,13	0,05	0,031	0,12	0,049	5,4	6	282	20,3	Средняя
2-16	1,0/0,03	Суглинок	54	0,038	0,177	0,09	0,085	0,13	0,079	6,4	10	236	20,8	Слабая
2-16а	1,0/0,03	Песок	20	0,013	0,065	0,026	0,023	0,04	0,032	5,1	12	311	20,8	»
1-45	1,0/0,03	Торф	75	Не определено					3,8	Не опред.	371	20	»	
1-51	2,5/0,08	Суглинок оторф.	25	0,035	0,191	0,096	0,096	0,15	0,084	4,6	2	333	20,5	Средняя
<i>Пургинская СПХГ</i>														
249	1,5/0,04	Супесь пыл.	37	0,03	0,15	0,01	0,03	0	0,16	5,4	4	487	28,19	Слабая
527	2,0/0,05	Глина легк.	48	0,1	0,29	0,02	0,08	0,1	0,2	5,1	5	506	32,26	»
5166	2,0/0,05	Торф	175	0,07	0,39	0,01	0,06	0,1	0,3	3,9	2	290	18,15	»
2356	2,0/0,05	Суглинок тяж.	22	0,07	0,34	0,01	0,04	0,1	0,28	4,7	5	301	20,25	»
515	0,3/0,01	Глина легк.	81	0,08	0,25	0,03	0,04	0,1	0,28	5,4	7	244	21,17	»
526	10/0,4свщц	Супесь	20	0,05	0,14	0,01	0,04	0,05	0,11	4,4	6	506	25	Высокая
<i>Елианская, Песчано-Уметская, Стетовская СПХГ</i>														
K15-K18	1,5/0,07	Суглинок	21	0,2	0,59	0,17	0,01	0,14	0,72	8	22	428	30,1	Средняя
422	1,5/0,2	То же	30	0,22	0,23	0,09	0,01	0,2	0,34	8	81	279	25,9	Высокая
467бис	2,0/0,4	»	16	0,16	0,51	0,02	0,01	0,28	0,4	8	39	558	34,4	»
4	2,0/0,11	»	6	0,17	0,54	0,02	0,01	0,32	0,39	8,2	99	433	31	»
151	1,5/0,1	»	10	0,14	0,26	0,01	0,01	0,13	0,26	8,4	94	510	34	»
145	2,0/0,08	»	16	0,26	0,58	0,03	0,01	0,34	0,48	9	59	313	28,5	Средняя
122	2,0/0,1	»	16	0,22	0,51	0,04	0,01	0,33	0,47	9,6	68	381	31,7	Высокая
<i>Северо-Ставропольская СПХГ</i>														
223	0,7/0,03	Суглинок тяж.	9,9	1,7	3,17	2,62	0,16	2,17	4,45	8,7	26	394	30,5	Слабая
235	1,0/0,1	То же	8,7	1,0	3,1	2,28	0,1	2,17	4,1	8,75	29	372	29,9	Средняя
264	0,2/0,02	»	11,2	0,78	2,6	2,44	0,18	1,32	4,02	9	32	368	29,2	Слабая
331	0,2/0,01	»	14,4	0,47	2,44	2,03	0,1	1,22	3,61	8,15	40	382	28,7	»

по химическому составу водных вытяжек. Отличие состоит в малых концентрациях поровых растворов и более высокой их влажности (10–30 %) по сравнению со ставропольскими (8–14 %). Как видим, влажность грунтов на севере черноземной зоны вдвое выше, чем ставропольских. Возможно, за счет более высокой влажности отвод продуктов коррозии на анодных участках будет осуществляться более активно, что обычно ускоряет коррозию. По мнению Г.В. Крылова, при увеличении влажности почвы от 10 % и более часто наблюдается некая критическая влажность почвы, при которой коррозионное разрушение максимально [Крылов и др., 2001]. По-видимому, на севере черноземной зоны мы наблюдаем “критическую влажность почвы”, при которой скорость коррозии максимальна. Более высокая влажность грунтов обычно ухудшает их аэрацию, что затрудняет доступ кислорода и действие его как ингибитора коррозии ослабевает, что также усиливает коррозию.

**Грунты на Пунгинской СПХГ** резко отличаются от грунтов черноземной зоны низким удельным электрическим сопротивлением (2–6 Ом·м) и низкими значениями рН (3,9–5,4). Эти факторы являются главными критериями высокой агрессивности почв. Кроме того, грунты отличаются большим разбросом значений ОВП и  $rH_2$ , что связано с резкой сменой хорошо аэрируемых и обводненных участков, резкой сменой аэробных и анаэробных условий и с образованием макропар дифференциальной аэрации. Грунты характеризуются глубоким сезонным промерзанием (2,0–2,5 м), избыточно высокой влажностью (40–80 %) и высоким содержанием органических остатков, предопределяющих повышенную кислотность почв. За исключением избыточной влажности, все отмеченные показатели прямо указывают на значительную коррозионную активность грунтов. Это подтверждается высокой скоростью коррозии, появлением “свищей” на трубопроводах Пунгинской СПХГ (глубина коррозии 10 мм, скорость более 0,3 мм/год). Несмотря на незначительную общую минерализацию (30–50 мг/л), высокая скорость коррозии металлов обусловлена содержанием в воде большого количества растворенного органического вещества (РОВ), в связи с чем в мягких водах помимо угольной кислоты в большом количестве могут содержаться органические кислоты (фульвокислоты), растворяющие железоорганические соединения, препятствующие образованию защитных пленок на поверхности металла. Описанные условия коррозии характерны для лесоболотной зоны Западной Сибири и Северо-Восточной части Европейской России, в грунтах которой главным активизатором коррозии является ион водорода.

Грунты в пределах **газового месторождения Медвежье** по своим физико-химическим характе-

ристикам близки к вышеописанным. Здесь также наблюдаются очень низкие значения удельного электрического сопротивления (6–12 Ом·м), низкие показатели рН (3,8–6,4), ОВП,  $rH_2$ , которые указывают на высокую коррозионную активность грунтов. Присутствие углекислоты увеличивает возможность коррозии с водородной деполяризацией, а присутствие  $CO_2$  в воде способствует растворению карбонатной пленки  $CaCO_3$  и переводу ее в раствор в виде бикарбоната  $Ca(HCO_3)_2$ . Скорость коррозии в описываемых грунтах (0,03–0,08 мм/год) примерно такая же, как и в южной лесоболотной зоне. На Уренгойском НГКМ, расположенном в области развития многолетнемерзлых грунтов, по данным ВНИПИгаздобыча (Саратов, 1988 г.), на МПК-1 от УКПГ-3 обнаружены каверны глубиной 3,1 мм, а скорость глубинной коррозии составляет 0,4 мм/год.

В целом, характеризуя скорости коррозии металлов в талых грунтах криолитозоны, можно отметить, что они такие же, как и в грунтах более южных зон: лесоболотной и черноземной степной.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализируя коррозионное повреждение трубопроводов Аляски и Канады, В.В. Притула [1975] отметил, что коррозионное разрушение поверхности подземных трубопроводов в полярных странах Северной Америки происходит по обычной схеме, так как трубопроводы находятся круглогодично в талом грунте ввиду того, что температура транспортируемого газа значительно выше 0 °С. Замедление коррозии происходит лишь при полном промерзании грунта вокруг тела трубы. В других условиях скорость коррозионных процессов сопоставима со скоростью коррозии в обычных условиях. Отмечаются даже следы жизнедеятельности сульфатвосстанавливающих бактерий.

На газовом месторождении Медвежье среднегодовая температура транспортируемого газа около 20 °С. Под влиянием высокой температуры транспортируемого газа грунты вокруг трубопровода, уложенного подземным способом, находятся в постоянно талом состоянии, поэтому скорость коррозии стальных газопроводов в почвах криолитозоны аналогична скоростям в таежной и степной зонах. Однако не только “теплый” газ играет существенную роль в повышении коррозионной активности грунтов. Присутствие в большом количестве ионов водорода (активных разрушителей окисной пленки на металлах и деполяризаторов в физико-химических реакциях окисления металлов), высокое содержание растворенных органических веществ и фульвокислот способствуют растворению железа и активной миграции различных соединений железа в растворимой форме.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные выше материалы показывают, что скорость коррозии металлов в криолитозоне достигает 0,4 мм/год, что соответствует скорости проникновения глубинной коррозии в лесной и степной зонах, а следовательно, криолитозона для трубопроводного подземного транспорта не является зоной химического покоя.

Главными факторами активизации подземной коррозии металлов в криолитозоне являются ионы водорода, растворенные органические вещества и фульвокислоты.

Возможно, на коррозию металлов в криолитозоне влияет циклическое промерзание и оттаивание, которые приводят к нарушению изоляционных покрытий и, по-видимому, влияют на состояние окисных пленок металлов.

Некоторые авторы [Шавлов и др., 2002] отмечают каталитические свойства льда при коррозии металлов. Этот факт еще не получил объяснения. Видимо, образующиеся кристаллы льда в незамерзшей пленке воды разрушают окисную пленку и тем самым ускоряют реакцию окисления.

Понять механизм подземной коррозии металлов и сделать надежную оценку степени влияния физико-химических особенностей грунтов невозможно без учета географических закономерностей их изменения на зональном уровне.

## Литература

**Акимов Г.В.** Теория и методы исследования коррозии металлов. М.; Л., Изд-во АН СССР, 1945, 396 с.  
**ГОСТ 9.602-89.** ЕСЗКС. Сооружения подземные. М., Изд-во стандартов, 1989, 56 с.  
**ГОСТ Р 51164-98.** Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. М., Изд-во стандартов, 1998, 48 с.

**Добровольский В.В.** Проблемы геохимии в физической географии. М., Просвещение, 1984, 143 с.

**Ершов Э.Д.** Физико-химия и механика мерзлых пород. М., Изд-во Моск. ун-та, 1986, 332 с.

**Зубов Н.Н.** Морские воды и льды. М., Гидрометеиздат, 1938, 453 с.

**Крылов Г.В., Степанов Д.А., Угрюмов Р.А.** Противокоррозионная защита магистральных трубопроводов: Справ. пособие. СПб., Недра, 2001, 190 с.

**Негреев В.Ф., Аллахвердиев Г.А.** Методы определения коррозионных свойств почв. Баку, Изд-во АН АзССР, 1953, 90 с.

**Перельман А.И.** Геохимия ландшафта. М., Высш. шк., 1966, 392 с.

**Пругула В.А.** Определение коррозионности почв. М., Гостехиздат, 1934, 51 с.

**Пругула В.В.** Защита от коррозии подземных трубопроводов Канады и Аляски. М., ВНИИОЭНГ, 1975, 64 с.

**Сауков А.А.** Геохимия. М., Гостехиздат, 1951, 292 с.

**Страхов Н.М.** Основы теории литогенеза. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1960, 212 с.

**Томашов Н.Д.** Теория коррозии и защиты металлов. М., Изд-во АН СССР, 1959, 592 с.

**Тютюнов И.А.** Физико-химическое изменение горных пород на Крайнем Севере // Физико-химические процессы в промерзающих и мерзлых горных породах. М., Изд-во АН СССР, 1961, с. 7–27.

**Улиг Г.Г.** Коррозия и борьба с ней: Пер. с англ. М., Metallurgia, 1968, 308 с.

**Францевич И.Н., Хрущева Е.В., Францевич-Заблудовская Т.Ф.** Катодная защита магистральных газопроводов. Киев, Изд-во АН УССР, 1948, 80 с.

**Шавлов А.В., Писарев А.Д., Емельянов Р.Н.** Особенности протекания реакции травления меди во льду при низких температурах // Материалы Междунар. конф. "Экстремальные криосферные явления: фундаментальные и прикладные аспекты". Пушкино, 2002, с. 177–178.

**Шварцев С.Л.** Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М., Недра, 1978, 287 с.

**Эванс Ю.Р.** Коррозия и окисление металлов. М., Машгиз, 1962, 856 с.

Поступила в редакцию  
27 декабря 2007 г.