

УДК 537.2; 537.67

## Влияние вариаций геомагнитной активности на трубопроводы на фазе роста 24-го солнечного цикла

Ю.М. Григорьев\*, Е.Н. Ефремова\*, В.И. Козлов\*\*, Л.Д. Тарабукина\*\*, А.А. Корсаков\*\*

\*Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск

\*\*Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, г. Якутск  
grigyum@yandex.ru, vkozlov@ikfia.ysn.ru

**Аннотация.** Представлены результаты измерений теллурических токов, протекающих по трубопроводам во время геомагнитных бурь, а также измерения электрических токов, протекающих по трубопроводам, проложенным в вечной мерзлоте в Якутии, во время разряда молнии, оканчивающегося на землю вблизи трубопроводов. Измерено влияние постоянного тока, протекающего через металлическую трубу, на изменение потенциала «труба–земля» в части трубопровода длиной 150 м и диаметром 110 мм. Частота встречаемости определенного уровня скорости изменения геомагнитной активности может быть выражена согласно степенному закону с показателем степени порядка  $-1,7$ , вероятность превышения данного уровня – по закону  $\lg(P) = -0,0517(dB/dt) - 0,1946$ . Наибольшие колебания высокой частоты отмечены во время фазы восстановления магнитной бухты и соответствуют геомагнитным пульсациям диапазона Pc5 (период вариаций 200–300 с). На трубопроводе на эти пульсации накладываются другие высокочастотные вариации, и они начинают раньше – от максимума бухты возмущения. Во время сильных геомагнитных бурь и грозы на расстоянии 10 км вокруг трубопровода в нем возникают геомагнитные индуцированные токи, достигающие десятков или даже сотен ампер. Вследствие этого повышается потенциал грунт–трубопровод и возможно усиление коррозии трубопровода.

Ключевые слова: трубопровод, магнитное возмущение, геомагнитные индуцированные токи, грозой разряд, вечная мерзлота.

## The Effect of Variations of Geomagnetic Activity on the Growth Phase of the 24th Solar Cycle on the Pipeline

Yu.M. Grigor'ev\*, E.N. Efremova\*, V.I. Kozlov\*\*, L.D. Tarabukina\*\*, A.A. Korsakov\*

\*M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk

\*\*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk  
grigyum@yandex.ru, vkozlov@ikfia.ysn.ru

**Abstract.** The results of measurements of telluric currents flowing through pipelines during geomagnetic storms are presented. Also, the measurements of electrical currents flowing through pipelines laid in permafrost in Yakutia during the discharge of lightning, terminated on the ground near pipelines, are presented. The influence of a direct current flowing through a metallic pipe on the «pipe-ground» potential variation in the piece of a pipeline with the length of 150 m and diameter of 110 mm is measured. The frequency of occurrence of a certain level of the rate of change of geomagnetic activity can be expressed as a power law with an exponent of the order  $-1.7$ , and the probability of exceedance of a given level can be expressed by the law  $\lg(P) = -0.0517(dB/dt) - 0.1946$ . The largest high-frequency variations are noted during the recovery phase of magnetic bay and correspond to geomagnetic pulsations of the Pc5 range (a period of variations of 200–300 s). On a

---

ГРИГОРЬЕВ Юрий Михайлович – д.ф.-м.н., зав. каф.; ЕФРЕМОВА Екатерина Нюргуновна – магистрант; КОЗЛОВ Владимир Ильич – к.ф.-м.н., доцент, в.н.с.; ТАРАБУКИНА Лена Дмитриевна – м.н.с., ассистент СВФУ; КОРСАКОВ Алексей Анатольевич – м.н.с.

*pipeline on these pulsations, other high-frequency variations are imposed and they start earlier – from a maximum of bay of disturbance. During strong geomagnetic storms and during a thunderstorm at a distance of 10 km around the pipeline, geomagnetic induced currents appear in it, reaching tens or even hundreds of amperes. As a result, the potential of soil-pipeline increases and it can increase the corrosion rate of a pipeline.*

Key words: pipeline, magnetic disturbance, geomagnetic induced currents, lightning discharge, permafrost.

## Введение

Поскольку количество и сложность технических систем растут, то влияние магнитных бурь на эти системы становится важным вопросом космической погоды, особенно на протяженные магистральные объекты. Проявление геомагнитных бурь на высоких широтах на континентах особенно сильно из-за близости к магнитному полюсу и наличия вечной мерзлоты, обладающей малой проводимостью.

Согласно закону электромагнитной индукции Фарадея, внутри замкнутого проводника в изменяющемся во времени магнитном поле индуцированная электродвижущая сила вызывает электрический ток. Таким образом, резкие колебания геомагнитного поля создают распределенные электрические поля и, соответственно, токи в магистральных объектах. На переходных участках с разной проводимостью возникает разность электрических потенциалов между трубопроводом и землей, в которой он проложен. В результате на этих участках электрохимическая коррозия резко возрастает.

Трубопроводы, проложенные в грунте, можно представить, как длинные проводящие линии, расположенные вблизи слоистого диэлектрика. Эти линии чувствительны к наведенным токам во время интенсивных геомагнитных бурь или грозы. Исследования по определению индуцированного тока дают значения до десятков [1] и сотни [2] ампер. Индуцированные напряжения и токи могут привести к серьезным повреждениям в технических системах. Теллурические токи значительно уменьшают срок службы трубопроводов из-за коррозии – разрушения металлических компонент в результате физико-химического взаимодействия с окружающей средой и взаимодействия между неоднородностями магистрали и неоднородностями окружающего грунта. В случае неоднородности среды некоторая часть трубы с меньшим доступом окислителя будет служить в качестве анода по отношению к части с большим доступом окислителя. Это увеличит скорость электрохимической коррозии. Неоднородность окружающей среды приводит к воздействию внешних токов на трубу. Точка входа блуждающих токов будет служить в качестве катода, а точка вытекания токов – анода. Местная коррозия подземных трубопроводов часто проявляется в виде язв, проникающих глубоко внутрь металла.

## Результаты и обсуждение

Особенностью трубопроводов, например, особенностью трубопровода Восточная Сибирь – Тихий океан нефти (ВСТО), частично расположенного в Якутии, является то, что протяженные трубопроводы прокладывают на глубине 2 м.

**Измерения во время гроз.** Проведены измерения электрических токов, наведенных в ветви нефтепровода «Тас-Юрях – Мирный» диаметром 0,5 м во время грозы и при спокойной погоде. Подобные измерения токов были также сделаны на ответвлении протяженностью около 20 км до п. Табага от магистрального газопровода «Средневилюйское месторождение газа – Магдалинское–Берге–Якутск». Труба этого ответвления имеет наружный диаметр 110 мм и внутренний диаметр 100 мм. Материал трубы – сталь высокой прочности. Эти измерения были сделаны во время наземных разрядов молнии в полосе 1–10 км от трубопровода. Экспериментально измеренные значения токов во время грозовых разрядов в исследуемых трубопроводах достигают десятков ампер.

Для наблюдения электромагнитных колебаний поля, излучаемых наведенными токами в трубопроводе, были использованы три горизонтальные магнитные рамочные антенны, расположенные на разных расстояниях от трубопровода. Для определения расположения грозы вблизи места наблюдения были использованы однопунктовая система местоопределения молнии ИКФИА, установленная на радиополигоне около Якутска, и система World Wide Lightning Location Network (WWLLN) [3], одна из станций которой расположена в Якутске [4]. WWLLN использует время прихода электромагнитного импульса, излучаемого разрядом молнии, по меньшей мере, 5 станций, наиболее близких к разряду для определения местоположения молнии [3]. На территории с границами 40–80° северной широты, 60–180° Е расположены 8 из 55 активных станций.

Получено, что грозовой фронт движется со средней скоростью 44 км/ч<sup>1</sup> и имеет среднюю площадь 5000–10000 км<sup>2</sup> [5]. Отсюда предполагается, что в приполярных широтах разряды молний одной грозы происходят в радиусе 10 км вокруг трубопровода в течение 1–2 ч, даже во время грозы, движущейся поперек трубопровода.

От тока, протекающего по трубопроводу «Гас-Юрях-Мирный», во время грозовых разрядов индуцированный сигнал в рамочной антенне, расположенной на расстоянии 3,5 м от трубы, был в 63 раза больше, чем сигнал тока, наведенного в рамочной антенне, размещенной на расстоянии 150 м. Расстояние до грозового разряда оценивалось по разнице во времени между временем вспышки молнии и звуком грома. Грозовой очаг пересекал трубопровод на расстоянии 5–10 км от места наблюдения по данным грозопеленгаторов. Аналогичные наблюдения были сделаны на газопроводе в 30 км от Якутска, когда гроза находилась в 3–10 км от места наблюдения и пересекала ответвление трубопровода к п. Табага. В этих измерениях получено, что во время ближней грозы величина сигнала магнитной составляющей электромагнитного поля, измеренная в непосредственной близости от трубопровода, была 190 раз больше, чем величина сигнала, индуцированного в рамочной антенне, расположенной на расстоянии 400 м от трубы. Рассчитанные токи в трубопроводе, индуцированные наземным разрядом молнии на расстоянии 3–7 км от места наблюдения, достигали 10 А. Пиковый ток возможно был больше, чем 10 А, но для продления срока службы оборудования было установлено верхнее пороговое значение на входе АЦП.

Карта плотности грозовых разрядов в зоне, где расположена система ВСТО, сделанная на основе данных сети WWLLN, представлена на рис.1. Плотность разрядов скорректирована на эффективность обнаружения грозовых разрядов системы WWLLN, которая составляет 11–15% и около 30% для молниевых разрядов с током более 100 кА [6]. Плотность была рассчитана за летние сезоны (1 июня–31 августа) в 2009–2014 гг., когда грозы активны на рассматриваемой территории.

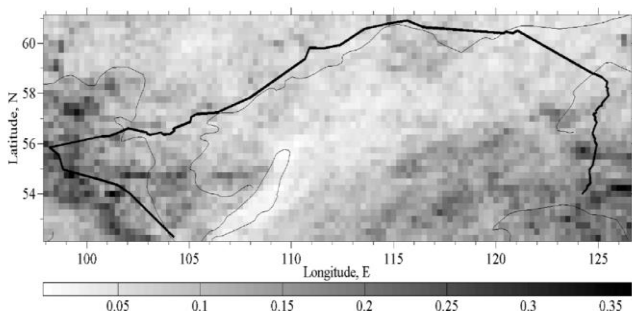


Рис.1. Карта плотности молний вдоль трубопровода ВСТО, полученная по данным WWLLN 2009–2014

### Измерения во время геомагнитных бурь.

Измерения были проведены на ответвлении к п. Табага от магистрального газопровода

«Средневилуйское газовое месторождение – Мастах–Берге–Якутск» и на ветки между распределительными станциями № 2 Якутск и с. Павловск. Трубопровод диаметром 0,53 м от распределительной станции газа № 2 Якутска доходит под землей до с. Хатассы и далее проложен под руслом р. Лена двойной газопровод. На противоположной стороне реки расположена газораспределительная станция в с. Павловск.

Для измерения наведенных токов, протекающих в газопроводе во время геомагнитных возмущений, были использованы два магнитометра. Один датчик был установлен рядом с трубопроводом (расстояние 1 м), второй датчик (используемый для сравнения) – на расстоянии 600 м от трубопровода. Наведенный ток определялся по разности величин магнитных возмущений, измеренных на двух, ближнем и дальнем от трубопровода, датчиках с учетом калибровки. Тестовые измерения для оценки чувствительности магнитного датчика проведены с помощью тока, проходящего по проводу, который располагался на расстоянии 1 м от датчика. Во время спокойной геомагнитной обстановки магнитометры, помещенные на трубопроводе и на расстоянии 600 м от трубопровода, показали аналогичную картину шума. Это свидетельствует об отсутствии индуцированных квазипостоянных токов в трубопроводе во время малых возмущений геомагнитного поля.

Измерения тока в трубопроводе были сделаны в течение трех мощных геомагнитных бурь. Во время магнитной бури 21.01.2005 ток в трубопроводе диаметром 0,11 достигал значений 3 А, во время шторма 28.05.2011 ток в трубопроводе диаметром 0,53 м – 0,5 А, во время шторма 27.08.2013 ток в трубопроводе диаметром 0,53 м – 0,3 А. Исследование измеряемого тока, протекающего через трубопровод во время сильных геомагнитных бурь, показало, что ток достигает десятков ампер и длится от нескольких часов до нескольких дней.

Методика экспериментального исследования воздействия геомагнитных возмущений на протяженные магистральные объекты может быть сведена к выявлению временных периодов, в которых величина скорости возрастания магнитного поля ( $dB/dt$ ) выше пороговых уровней [7, 8]:  $>5$  нТл/мин (активное поле) резко увеличивается коррозия при отсутствии дополнительной защиты;  $> 20$  нТл/мин (шторм) коррозия резко увеличивается даже при наличии защиты;  $>30$  нТл/мин (экстремальный шторм) происходит воздействие на энергетические системы.

Рассмотрим вероятность превышения определенного уровня  $dB/dt$  на примере очень сильной магнитной бури 05.08.2011. С 17 до 20 ч

уровень возмущения достиг G4, а от 20 до 23 ч – G3, при переходе к 06.08.2011 от 23 до 02 ч – G2, от 02 до 05 ч – G1. А далее до 08:00 07.08.2011 интенсивность бури равномерно снизилась. За весь день 05.08.2011 интервалы времени со скоростью изменения магнитного поля  $>5\text{nT}$  составляли 7,15 %,  $>20\text{nT}$  – 1,18 %,  $>30\text{nT}$  – 0,42 %  $b < -5\text{nT}$  – 6,6 %,  $< -20\text{nT}$  – 1,32 %,  $< -30\text{nT}$  – 0,56 %. Частота встречаемости заданного уровня  $\text{dB}/\text{dt}$  определяется выражением  $n=444,84(\text{dB}/\text{dt})^{-1,717}$ , где  $R^2 = 0,85$ . Или вероятность превышения уровня может быть выражена как:  $\lg(P)=-0,0517(\text{dB}/\text{dt})-0,1946$  при  $R^2=0,99$  (рис.2).

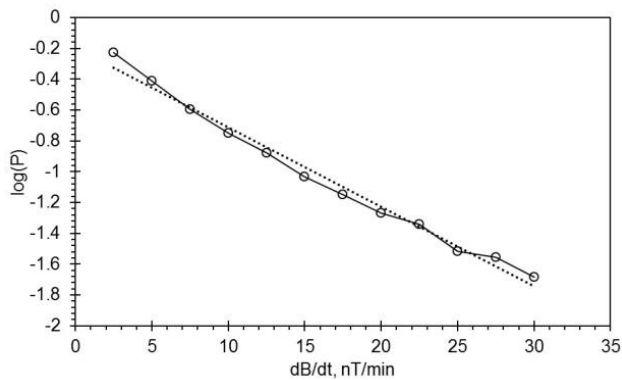


Рис. 2. Вероятность (P) в зависимости от уровня изменения  $\text{dB}/\text{dt}$ :  $\lg(P) = -0,0517(\text{dB}/\text{dt}) - 0,1946$ ,  $R^2=0,99$  (5–6.08.2011)

При рассмотрении зависимости тока в трубопроводе от скорости вариаций магнитного поля на примере геомагнитной бури 28.05.2011 получено, что ток в трубопроводе в зависимости от скорости вариаций магнитного поля  $\text{dB}/\text{dt}$  [нТ/мин] может быть выражен как (рис.3):  $I = 0,024*(\text{dB}/\text{dt}) + 0,07$ .

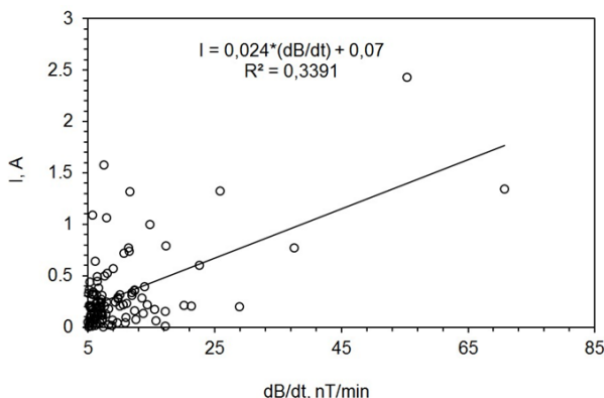


Рис. 3. Ток в трубопроводе, вызванный вариациями магнитного поля 28.05.2011

**Измерения разности потенциалов «трубопровод–грунт».** Проведено исследование влия-

ния величины постоянного тока, протекающего по трубопроводу на изменение разности потенциалов «трубопровод–грунт». Эксперимент был проведен на части закопанного трубопровода со следующими параметрами: длина – 150 м, диаметр – 110 мм, толщина – 11 мм. Эта кусок газопровода между Якутском и п. Табага, который пересекает насыпная гравийная дорога, создавая неоднородность в грунте вокруг трубопровода. Получено, что разность потенциалов ( $\Delta U_{\text{тр-гр}}$ ) «трубопровод–грунт» в зависимости от тока в трубопроводе ( $I_{\text{тр}}$ ) выражается как  $\Delta U_{\text{тр-гр}} = 0,4598 I_{\text{тр}} - 0,0053$   $R^2 = 0,9998$  (рис.4). Естественный потенциал стали в грунте примерно равен  $-0,55...-0,6$  В. В наших измерениях естественный потенциал равен  $U_{\text{тр-гр}} = -0,33$  В. Смещение потенциала в положительную сторону вызывает повышенную коррозию в трубопроводе. Рис. 5 демонстрирует коррозию трубопровода в Якутске.

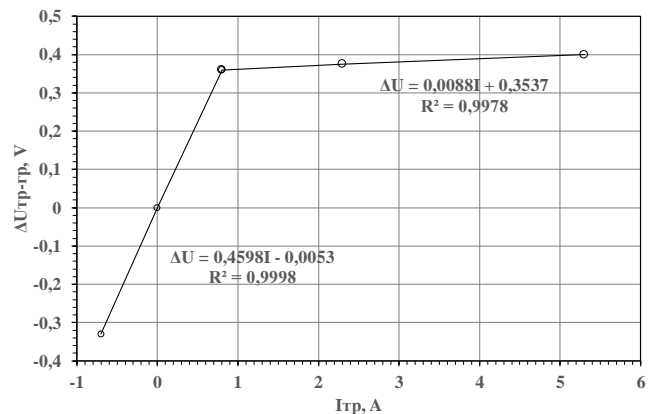


Рис. 4. Экспериментальные значения разности потенциалов  $\Delta U_{\text{тр-гр}}$  «трубопровод–грунт» в зависимости от величины постоянного электрического поля  $I_{\text{тр}}$ , пропускаемого по трубопроводу

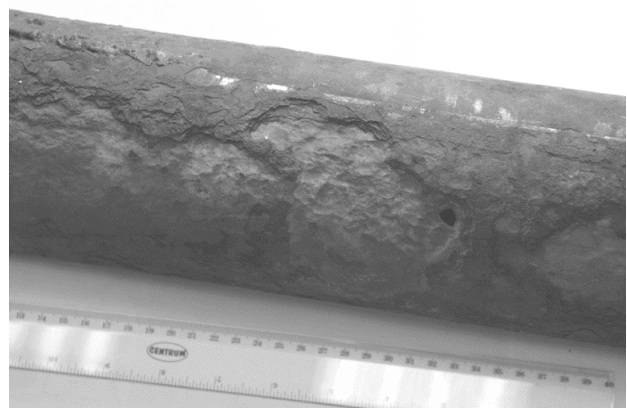


Рис. 5. Образец трубы, исследуемой при измерениях потенциала «трубопровод–грунт» в зависимости от величины постоянного электрического тока. Трубопровод расположен недалеко от Якутска. Хорошо видны повреждения трубы, вызванные коррозией

В работе [9] получено, что потенциал «трубопровод–грунт» в частях газопровода «Пунга-Вуктыл», где часто случались аварии, изменялся от  $-4,5$  до  $+2,5$  В. Тестовые измерения потенциала «трубопровод–грунт» в зависимости от величины постоянного электрического тока в закопанном трубопроводе показали, что если ток равен нулю, то потенциал также будет равен нулю, а если ток повышается до 5 А, потенциал будет линейно возрастать до 1,6 В. Если ток пойдет в обратном направлении, потенциал изменится до  $-0,5$ В [9]. Разность потенциалов ( $\Delta U_{\text{тр-гр}}$ ) «трубопровод–грунт» в зависимости от тока в трубопроводе ( $I_{\text{тр}}$ ) выражается как  $\Delta U_{\text{тр-гр}} = 0,23 I_{\text{тр}}$ . Данные соответствуют нашим результатам, за исключением величины насыщения потенциала и крутизны зависимости, которые определяются состоянием местной почвы. В нашем случае – это мерзлый грунт.

Таким образом, во время сильных геомагнитных бурь и грозы на расстоянии 10 км вокруг трубопровода в нем возникают геомагнитные индуцированные токи, достигающие десятков или даже сотен ампер. Вследствие этого повышается потенциал грунт–трубопровод и возможно усиление коррозии трубопровода.

*Исследования частично финансированы РФФИ № 15-45-05005 r\_vostok\_a и программой комплексных исследований в Республике Саха (Якутия).*

#### Литература

1. Авакян С.В., Воронин Н.А. Роль космических и ионосферных возмущений в глобальных климатических изменениях и коррозии трубо-

проводов // Исследования Земли и космоса. 2011. Т. 3. С.14–29.

2. Torta J.M., Marsal S., Quintana M. Assessing the hazard from geomagnetically induced currents to the entire high-voltage power network in Spain // Earth Planets and Space 66(1), 87 (2014).

3. Dowden R.L., Brundell J.B., Rodger C.J. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 64(7), 817–879 (2002).

4. Tarabukina L.D., Kozlov V.I., Karimov R.R., Mullayarov V.A. Spatial distribution of lightning strikes over North Asia // Proc. SPIE 9680, 96805S (2015).

5. Kozlov V.I., Mullayarov V.A., Vasilyev A.E. Characteristics of thunderstorm cores in Yakutia in 1993–2001 from instrumental observations // Russian Meteorology and Hydrology. 3, 27–31 (2003).

6. Abarca S.F., Corbosiero K.L., Galarneau T.J. Jr. An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth // J. Geophys. Res. 115, D18206 (2010).

7. Boteler D.H., Pirjola R.J., Nevanlinna H. The Effects of Geomagnetic Disturbances on Electrical Systems at the Earth's Surface // Adv. Space Res. 1998. V. 22. P. 17–27.

8. Koen J., Gaunt C.T. Geomagnetically induced currents at mid-latitudes / URSI, Maastricht, August 2002.

9. Фуркин А.В., Третьякова М.В., Агиней Р.В. Влияние протекающего по подземному трубопроводу постоянного электрического тока на потенциал «труба–земля» // Труды Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2014. Т. 1 (17). С. 80–83.

*Поступила в редакцию 31.03.2017*