

УДК 550.389.5

# О влиянии экстремальной геомагнитной активности на точность проведения геофизических исследований в северных регионах

**И.Е. Соколов, А.В. Воробьев**

Уфимский государственный нефтяной технический университет

450064, Российская Федерация, Уфа, ул. Космонавтов, д. 1. E-mail: geomagnet@list.ru

(Статья поступила в редакцию 19 апреля 2024 г.)

Статья затрагивает проблематику влияния экстремальной геомагнитной активности на проведение геофизических исследований и операций в северных регионах. В работе даны краткие сведения о природе и локализации экстремальных геомагнитных возмущений и рассмотрено, как геомагнитные возмущения влияют на проведение геофизических работ в зоне аврорального овала. На примере геомагнитного шторма, произошедшего 29–30 октября 2003 г., показано, как меняются компоненты магнитного поля и магнитное склонение в пределах одной магнитной обсерватории. Также на примере расположенных в широтах  $78,92^{\circ}$ – $58,26^{\circ}$  станций показано, как меняются значения отклонения магнитного склонения от нормы.

Ключевые слова: геофизические исследования, геомагнитная активность, авроральная зона, геомагнитный шторм, магнитное склонение.

DOI: 10.17072/psu.geol.23.3.267

## Введение

Северный регион подвержен интенсивным и частым возмущениям магнитного поля Земли, что влияет на биосферу и техносферу в данной местности (Kozuyeva и др., 2022). В частности, влияние геомагнитной активности на проведение геофизических исследований может внести существенные неточности в данные, что создает повышенный риск отклонения при бурении и может оказывать негативное воздействие на экономическую эффективность проектов. Это несет значительные препятствия для проведения исследований, основанных на магнитных измерениях, и требует разработки новых подходов и технологий для подавления негативных воздействий.

Одним из способов снижения влияния геомагнитных бурь на точность измерений является использование данных с ближайших к месту проведения исследований обсерваторий. Однако логистические и технические ограничения могут затруднить размещение таких обсерваторий в непосредственной близости от мест бурения.

Принимая во внимание высокий интерес к северному региону во множестве работ,

можно судить о том, что данная территория является чрезвычайно перспективной для нефтяной промышленности (Валева, 2011; Визе, 1932; Грамберг и др., 1969). В свете растущего к ней интереса вопрос оперативного приема, регистрации и обработки активно меняющихся магнитных характеристик поля во время геомагнитной активности стал особенно актуальным (Воробьев, Воробьева, 2017).

## Краткие сведения о природе и локализации экстремальных геомагнитных возмущений

Магнитные колебания, которые вызывают геомагнитные бури, имеют сложный и многогранный характер, поэтому до сих пор активно изучаются учеными. Бури могут быть краткосрочными либо достигать по продолжительности нескольких дней. Их происхождение связано с влиянием на геомагнитное поле Земли заряженных частиц, вызванным течением солнечного ветра и наличием космических излучений (Скорыходов и др., 2013).

В результате такого взаимодействия происходит изменение кольцевого тока в

магнитосфере, что и приводит к возникновению геомагнитных бурь. Бури имеют значительное влияние не только на Земле, но и в околоземном космическом пространстве. Например, геомагнитные бури могут ухудшить радиосвязь, создавать трудности в работе систем навигации и связи, а также вызывать наведенные токи в линиях электропередач, что может приводить к авариям и повреждениям инфраструктуры (Скорыходов и др., 2013).

Земное магнитное поле состоит из нескольких компонентов: главного поля, генерируемого в ядре Земли, корового поля от местной геологии и внешнего поля, создаваемого системами электрических токов в ионосфере и магнитосфере. Основная часть магнитного поля Земли в значительной степени генерируется в её ядре и меняется относительно медленно – менее чем на 150 нТл в год, а направление изменяется на несколько угловых минут в год по большей части земного шара, за исключением магнитных полюсов (Beggan и др., 2013).

Внешнее поле варьируется более быстро и интенсивно, вызывая изменения магнитного поля. Данные колебания связаны с ионизацией заряженными частицами верхних слоёв атмосферы с последующим возникновением сложной системы электрических токов, которые могут повлечь за собой флуктуации геомагнитного поля, при которых их интенсивность может достигать свыше 3000 нТл и вызывать смену направления действия поля на несколько градусов, особенно на высоких широтах, близких к авроральным регионам (Beggan и др., 2013; Lukianova, Christiansen, 2006; Papitashvili и др., 2002).

### **Влияние геомагнитных возмущений на геофизические исследования в северных регионах**

Подверженность траектории скважины влиянию геомагнитных воздействий является значительной проблемой из-за высокой восприимчивости северных широт к возмущениям геомагнитного поля Земли, вызванным магнитосферными бурями (Гвишиани, Лукьянова, 2018). Они создают колебания азимута, что может привести к резким изменениям геометрических параметров скважины и

значительным отклонениям от запланированного направления. Во время магнитной бури в авроральной зоне колебания магнитного склонения могут вызывать резкие отклонения магнитной стрелки от направления на магнитный полюс, что может привести к потере направления на истинный север. Следовательно, фактическая траектория бурения скважины окажется вне круга допуска, что потребует серьезной коррекции или даже остановки бурения для проверки правильности измерений (Булатов и др., 2003; Гвишиани, Лукьянова, 2018).

Во время магнитных бурь, даже умеренной интенсивности, амплитуда геомагнитных возмущений в авроральной зоне может составлять около 1000 нТл, и во время экстремальных бурь отклонения могут превышать 5000 нТл, что приводит к неприемлемо высоким ошибкам в позиционировании скважины. Любое значительное отклонение требует коррекции траектории бурения в реальном времени. Коррекции измерений инклинометра скважин обычно основаны на записи магнитных характеристик поля обсерваторией, оснащенной современными инструментами и расположенной в пределах 100 км от места бурения. Если данные отклонения не отфильтровываются на основе параллельных измерений в геомагнитных обсерваториях, они могут привести к недопустимо большим ошибкам в инклинометрических измерениях. Частота и интенсивность магнитных бурь, которые более распространены в северных регионах в периоды высокой солнечной активности, усугубляют эту проблему.

Рассмотрим событие, происходившее с 29.10.2003 по 30.10.2003. Серия солнечных вспышек вызвала один из самых мощных геомагнитных штормов с 1994 г. Максимальный К-индекс, характеризующий геомагнитную активность и классифицирующий геомагнитные бури, составил 9 баллов (табл. 1).

В целях определения влияния геомагнитных возмущений на геофизические исследования воспользуемся магнитными данными, предоставленными магнитной обсерваторией «Сёрёйа» (Soerøya, код обсерватории SOD, географические координаты 70,54° N, 22,2° E) в рамках международной системы мониторинга геомагнитной активности IMAGE (<https://space.fmi.fi/image>).

Данные, полученные обсерваторией, представляют собой компоненты магнитного поля (северная  $X$ , восточная  $Y$ , вертикальная  $Z$ ), составляющие вектор напряженности магнитного поля Земли  $F$  (рис. 1). В целях определения изменения магнитного склонения  $D$  (угол между северной компонентой  $X$  и горизонтальной проекцией вектора напряженности  $H$ ) с течением времени, воспользуемся формулой  $D = \arctan(Y/X)$  для пересчета компонент в магнитное склонение  $D$  и построим диаграммы (рис. 2, 3).

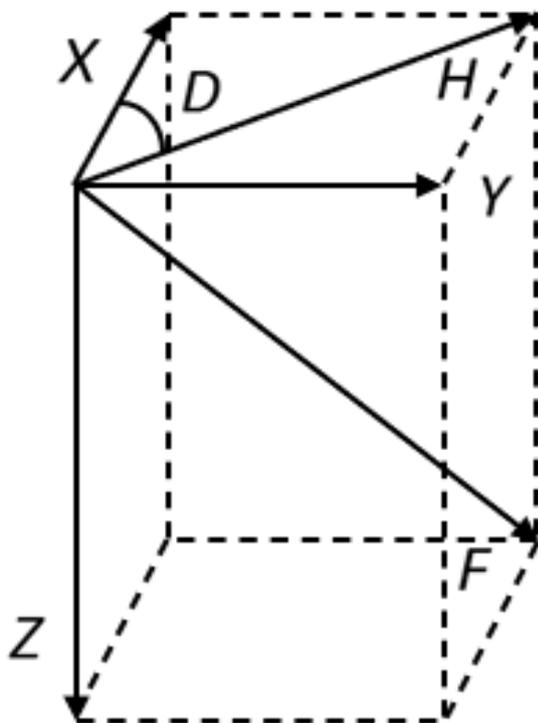


Рис. 1. Компоненты вектора напряженности

Диаграмма показывает, как меняется магнитное склонение во время геомагнитного шторма. В дни тишины (28.10.2003 и 31.10.2003) среднее значение магнитного склонения составило  $7,3^\circ$ , график не имел резких изменений. Начиная с 5:00 29.10.2003 и заканчивая 00:00 31.12.2003, наблюдаются постоянные резкие изменения склонения. При пиковой геомагнитной активности, произошедшей в 7:00 29.10.2003 и 19:00 30.10.2003, максимальные значения склонения составили  $11,23^\circ$  и  $11,40^\circ$  соответственно.

Таким образом, присутствует необходимость применения высокоточного магнитометрического оборудования для мониторинга быстрых вариаций магнитного поля в реальном времени и дальнейшей корректировки измерений инклинометра.

### Зависимость точности исследований от широтного диапазона

В целях оценки отклонений фактического бурения от запланированного в периоды геомагнитной активности используются агрегированные данные геомагнитных обсерваторий и станций. Данные включают в себя полные значения компонент магнитного поля (северной, восточной и вертикальной), которые, в свою очередь, позволяют получать абсолютные среднечасовые значения магнитного склонения (Гвишиани, Лукьянова, 2018).

На примере магнитограмм серии обсерваторий, расположенных в широтах  $78,92^\circ$ – $58,26^\circ$  в порядке убывания (табл. 2), рассмотрим обработанные магнитные данные (рис. 4).

Построенные для убывающих по географическим широтам обсерваторий гистограммы указывают на снижающуюся активность вариаций магнитного склонения по мере движения к низким широтам.

Снижение степени вариаций магнитного склонения в направлении юга вызвано отдалением от аврорального овала. Значения отклонения от нормы во время геомагнитной активности постоянно изменяются и могут достигать  $10^\circ$ , что определенно вызывает трудности при проведении геофизических исследований. При отдалении от аврорального овала в направлении северных широт также будет наблюдаться аналогичная картина (Соловьев и др., 2022).

Таким образом, бурение должно проводиться вблизи магнитной обсерватории в целях более точной и оперативной коррекции данных.

Таблица 1. К-индекс во время геомагнитного шторма ([www.spaceweatherlive.com](http://www.spaceweatherlive.com))

Дата	00–03	03–06	06–09	09–12	12–15	15–18	18–21	21–00	К <sub>p</sub> max
29.10.2003	5-	4	9	8	8-	8-	9-	9-	9
30.10.2003	9-	7+	5+	5-	5	7	9	9	9

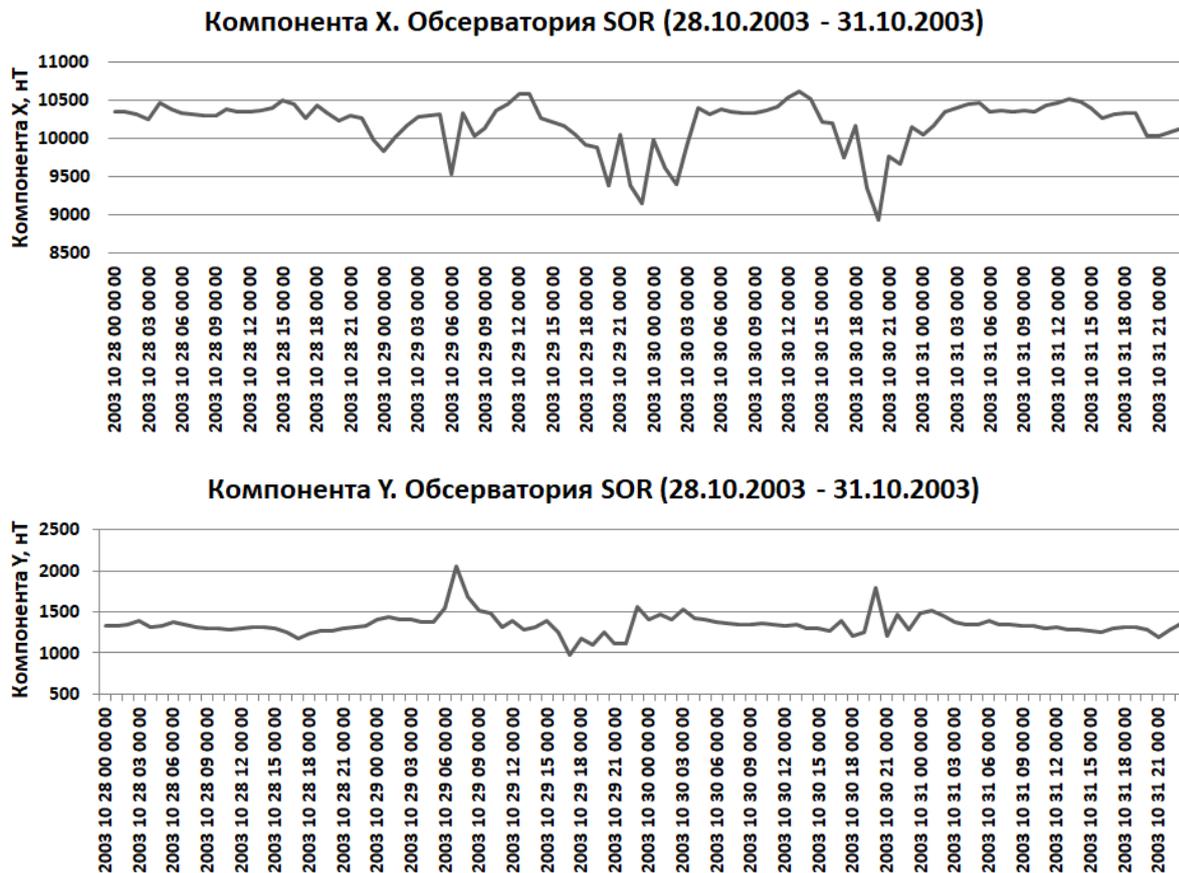
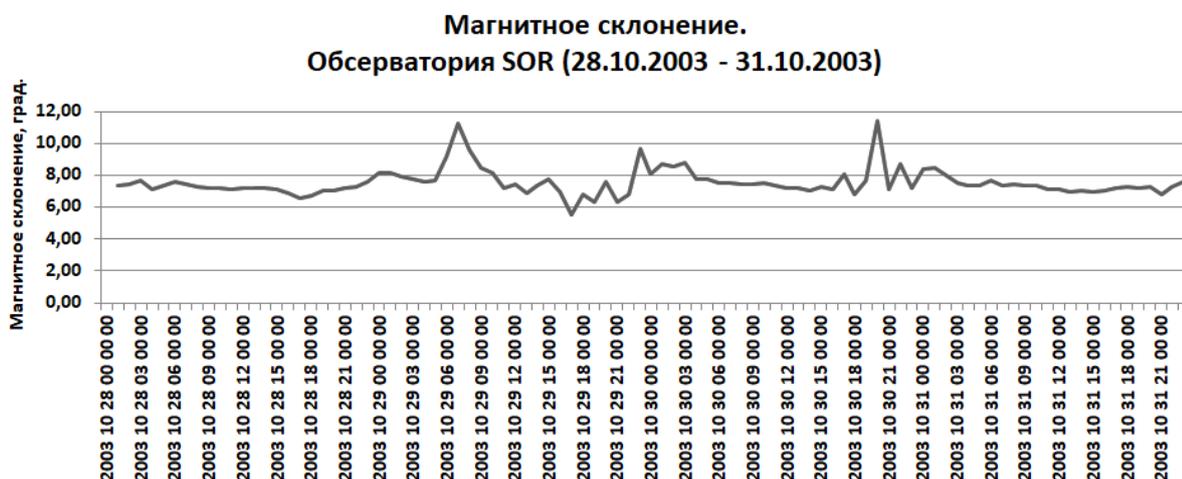
Рис. 2. Изменения компонент X и Y во время геомагнитного шторма 29.10.2003 – 30.10.2003 (<https://space.fmi.fi>)

Рис. 3. Изменение магнитного склонения во время геомагнитного шторма 29.10.2003 – 30.10.2003

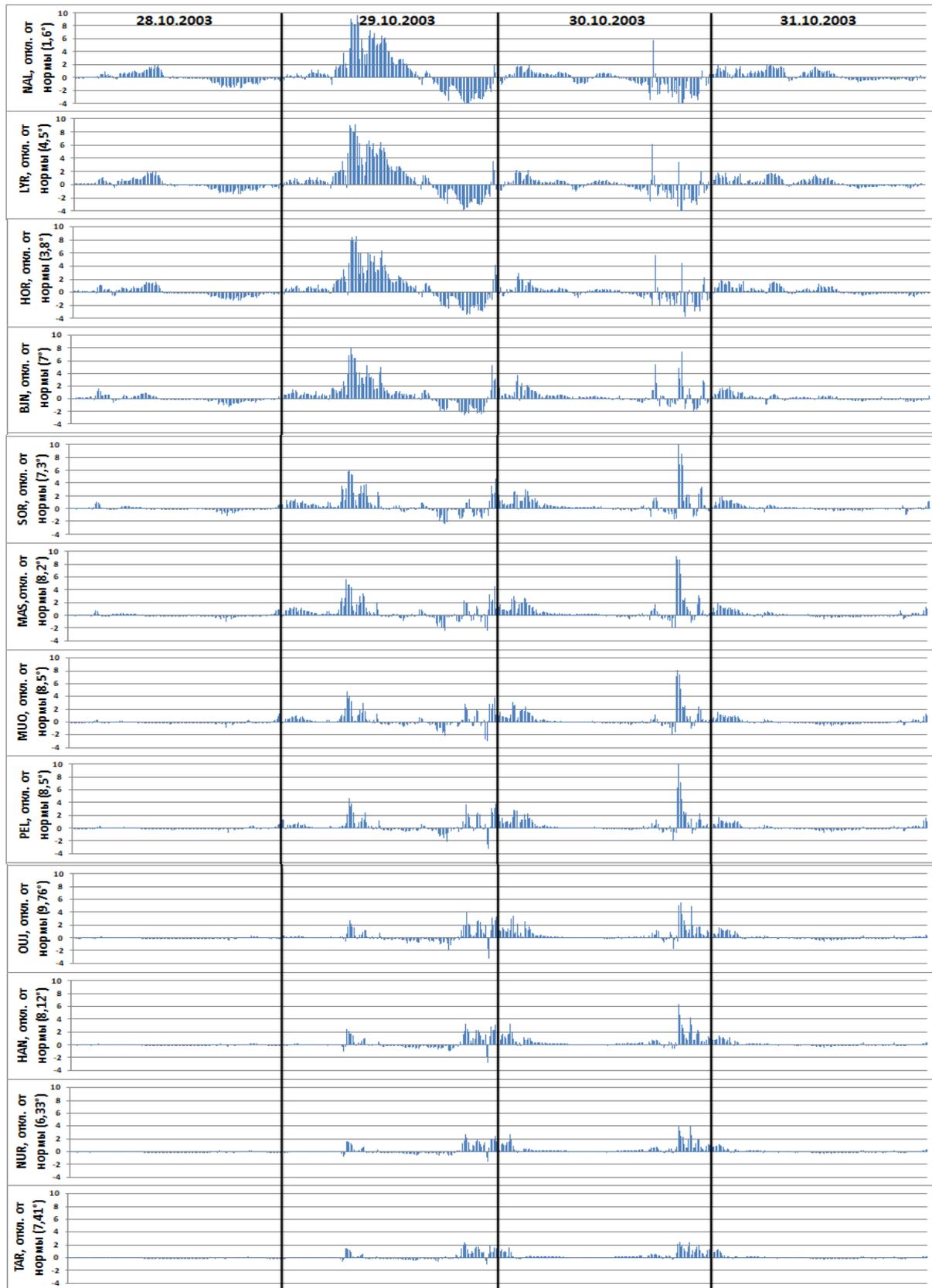


Рис. 4. Гистограмма значений отклонения магнитного склонения от нормы во время магнитной бури 29.10.2003 – 30.10.2003. Отклонения посчитаны путем вычитания из магнитного склонения (t) усредненного магнитного склонения «тихого дня». Исходные данные принадлежат системе магнитного мониторинга «IMAGE» (<https://space.fmi.fi>)

**Таблица 2.** Географическое положение обсерваторий

№	Шифр	Название	Географическая широта, °	Географическая долгота, °
1	NAL	Ny Alesund	78,92	11,95
2	LYR	Longyearbyen	78,20	15,82
3	HOR	Hornsund	77,00	15,60
4	BJN	Bear Island	74,50	19,20
5	SOR	Soeroeya	70,54	22,22
6	MAS	Masi	69,46	23,70
7	MUO	Muonio	68,02	23,53
8	PEL	Pello	66,90	24,08
9	OIJ	Oulujärvi	64,52	27,23
10	HAN	Hankasalmi	62,25	26,60
11	NUR	Nurmijärvi	60,50	24,65
12	TAR	Tartu	58,26	26,46

### Заключение

В работе рассмотрено, как экстремальная геомагнитная активность влияет на проведение геофизических работ в северных регионах и в зоне аврорального овала (не закончено). На примере геомагнитного шторма, произошедшего 29–30 октября 2003 г. показано, как меняются компоненты магнитного поля и магнитное склонение в частности.

Геомагнитные обсерватории и станции играют ключевую роль в фильтрации магнитных помех при проведении инклинометрических исследований скважин в северных условиях. Обсерватории проводят регулярные геомагнитные наблюдения, необходимые для решения задач физики Земли, солнечно-земных связей, радиофизики, экологии, геологии и геологоразведки. Они также обеспечивают точные данные для привязки спутниковых магнитных измерений.

Использование данных из геомагнитных обсерваторий в процессе инклинометрических исследований скважин позволяет

увеличить точность и надежность измерений. Оперативные и точные данные, получаемые из этих обсерваторий, могут быть интегрированы в реальном времени для коррекции и калибровки данных, полученных от инклинометрических датчиков в скважинах.

В целях коррекции магнитных данных с большей точностью и оперативностью, для расширения проектов в северных регионах и развития независимой отечественной технологии геомагнитной коррекции в целом, следует расширять сеть геомагнитных обсерваторий, создавать пункты приема, регистрации и обработки магнитных данных на территории Российской Федерации.

### Библиографический список

Булатов А.И., Проселков Ю.М., Шаманов С.А. Техника и технология бурения нефтяных и газовых скважин. Учебник для вузов. М.: Недра, 2003. 1007 с.

Валяев Б.М. Углеродородная дегазация Земли: геотектоника и происхождение нефти и газа. В сборнике: Дегазация Земли и генезис нефтегазовых

месторождений (к 100-летию со дня рождения акад. П.Н. Кропоткина). М.: ГЕОС, 2011. С. 10–32.

*Визе В.Ю.* История исследования советской Арктики: Баренцево и Карские моря. Архангельск: Северное издательство, 1932. 212 с.

*Воробьев А.В., Воробьева Г.Р.* Оценка влияния геомагнитной активности на метрологические характеристики инклинометрических информационно-измерительных систем // Измерительная техника: ежемесячный научно-технический журнал. 2017. № 6. С. 21–24.

*Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю.* Оценка влияния геомагнитных возмущений на траекторию наклонно-направленного бурения глубоких скважин в Арктическом регионе // Физика Земли. 2018. № 4. С. 19–30. doi: 10.1134/S0002333718040051

*Граumberг И.С., Сороков Д.С., Лазуркин Д.В.* Задачи и направления региональных геолого-геофизических работ на нефть и газ в Арктической части Восточной Сибири // Геология нефти и газа. 1969. № 2. С. 27–31.

*Скорыходов И.А., Тасенко С.В., Шатов П.В., Гецелев И.В., Подзолко М.В.* Учет влияния геомагнитных бурь при проектировании различных систем // Известия ЮФУ. Технические науки, 2013. № 7 (144). С. 160–166.

*Соловьев А.А., Сидоров Р.В., Ощенко А.А., Зайцев А.Н.* О необходимости высокоточного мониторинга геомагнитного поля при наклонно-направленном бурении в АЗРФ // Физика Земли. 2022. № 3. С. 136–152. doi: 10.31857/S0002333-722020120; doi: 10.1134/S1069351322020124

*Beggan C.D., Macmillan S., Brown W.J., Grindrod S.J.* Quantifying global and random uncertainties in high resolution global geomagnetic field models used for directional drilling // SPE Drilling and Completion. 2021. Vol. 36 (3). P. 603–612. doi: 10.2118/204038-PA

*Kozyreva O.V., Pilipenko V.A., Marshalko E.E., Sokolova E.Y., Dobrovolsky M.N.* Monitoring of Geomagnetic and Telluric Field Disturbances in the Russian Arctic // Applied Science. 2022. Vol. 12. P. 3755 doi: 10.3390/app12083755

*Lukianova R., Christiansen F.* Modeling of the global distribution of ionospheric electric field based on realistic maps of field aligned currents // Space Physics. 2006. P. 111. doi: 10.1029/2005JA011465

*Papitashvili V.O., Christiansen F., Neubert T.* A new model of field aligned currents derived from high precision satellite magnetic field data // Geophysical Research Letters. 2002. Vol. 29, No. 14. P. 1683. doi: 10.1029/2001GL014207

## On the Influence of Extreme Geomagnetic Activity on the Accuracy of Geophysical Surveys in Northern Regions

**I.E. Sokolov, A.V. Vorobyov**

Ufa State Petroleum Technical University,

1 Kosmonavtov Str., Ufa 450064, Russia E-mail: geomagnet@list.ru

The article touches upon the problem of influence of extreme geomagnetic activity on geophysical research and operations in the northern regions. The paper gives brief information about the nature and localization of the extreme geomagnetic disturbances, and considers how geomagnetic disturbances affect geophysical operations in the auroral oval zone. On the example of the geomagnetic storm that occurred on October 29–30, 2003, it is shown how the magnetic field components and magnetic declination change within one magnetic observatory. It is shown how the values of magnetic declination deviation from the norm change on the example of the stations located in latitudes 78.92°–58.26°.

Key words: *geophysical studies; geomagnetic activity; auroral zone; geomagnetic storm; magnetic declination.*

### References

*Beggan C.D., Macmillan S., Brown W.J., Grindrod S. J.* 2021. Quantifying global and random uncertainties in high resolution global geomagnetic field models used for directional drilling. SPE Drilling and Completion. 36(3):603–612. doi: 10.2118/204038-PA

*Bulatov A.I., Proselkov Y.M., Shamanov S.A.* 2003. Tekhnika i tekhnologiya bureniya neftyanykh i

gazovykh skvazhin. [Technique and technology of oil and gas wells drilling]. Nedra, Moskva, pp. 1007. (in Russian)

*Gramberg I.S., Sorokov D.S., Lazurkin D.V.* 1969. Zadachi i napravleniya regionalnykh geologo-geofizicheskikh rabot na nef't i gaz v Arkticheskoy chasti Vostochnoy Sibiri [Problems and directions of regional geological and geophysical works for oil and gas in the Arctic part of Eastern Siberia]. Geologiya nef'ti i gaza. 2:27–31. (in Russian)

- Gvishiani A.D., Lukyanova R.Yu.* 2018. Otsenka vliyaniya geomagnitnykh vozmushcheniy na traektoriyu naklonno-napravlennoogo bureniya glubokikh skvazhin v Arkticheskom regione [Assessment of the influence of geomagnetic disturbances on the trajectory of directional deep wells drilling in the Arctic region]. *Fizika Zemli*, 4:19–30. (in Russian) doi:10.1134/S0002333718040051
- Kozyreva O.V., Pilipenko V.A., Marshalko E.E., Sokolova E.Y., Dobrovolsky M.N.* 2022. Monitoring of Geomagnetic and Telluric Field Disturbances in the Russian Arctic. *Applied Science*. 12:3755. doi:10.3390/app12083755
- Lukianova R., Christiansen F.* 2006. Modeling of the global distribution of ionospheric electric field based on realistic maps of field aligned currents. *Space Physics*. pp. 111. doi: 10.1029/2005JA011465
- Papitashvili V.O., Christiansen F., Neubert T.* 2002. A new model of field aligned currents derived from high precision satellite magnetic field data. *Geophysical Research Letters*. 29(14):1683. doi: 10.1029/2001GL014207
- Skorokhodov I.A., Tasenko S.V., Shatov P.V., Getselev I.V., Podzolko M.V.* 2013. Uchet vliyaniya geomagnitnykh bur pri proektirovanii razlichnykh sistem [Accounting for the influence of geomagnetic storms in the design of various systems]. *Izvestiya YuFU. Tehnicheskie nauki*, 7(144):160–166. (in Russian)
- Solovev A.A., Sidorov R.V., Oshchenko A.A., Zaitsev A.N.* 2022. On the Need for Accurate Monitoring of the Geomagnetic Field during Directional Drilling in the Russian Arctic. *Izv. Phys. Solid Earth*. 58:420–434 doi:10.1134/S1069351322020124
- Valyaev B.M.* 2011. Uglevodorodnaya degazatsiya Zemli: geotektonika i proiskhozhdenie nefi i gaza [Hydrocarbon Degassing of the Earth: Geotectonics and Origin of Oil and Gas]. In: *Degazatsiya Zemli i genezis neftegazovykh mestorozhdeniy (k 100-letiyu so dnya rozhdeniya akad. P. N. Kropotkina*. Moskva, GEOS, pp. 10–32. (in Russian)
- Vise V.Yu.* 1932. *Istoriya issledovaniya sovetsoy Arktiki: Barentsevo i Karskie morya* [History of the Soviet Arctic Research: Barents and Kara Seas]. Arkhangelsk, Severnoye Izdatelstvo, pp. 212. (in Russian)
- Vorobyev A.V., Vorobyova G.R.* 2017. Otsenka vliyaniya geomagnitnoy aktivnosti na metrologicheskie kharakteristiki inklinometricheskikh informatsionno-izmeritelnykh sistem [Evaluation of the influence of geomagnetic activity on the metrological characteristics of inclinometric information-measuring systems] *Izmeritel'naya tekhnika*. 6:21–24. (in Russian)