

О НЕОБХОДИМОСТИ ВЫСОКОТОЧНОГО МОНИТОРИНГА ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ НАКЛОННО-НАПРАВЛЕННОМ БУРЕНИИ В РОССИЙСКОЙ АРКТИКЕ

© 2022 г. А. А. Соловьев^{1, 2, *}, Р. В. Сидоров^{1, **}, А. А. Ощенко¹, А. Н. Зайцев^{1, 3}

¹Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

³Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: a.soloviev@gcras.ru

**E-mail: r.sidorov@gcras.ru

Поступила в редакцию 08.02.2021 г.

После доработки 03.08.2021 г.

Принята к публикации 03.08.2021 г.

Показания скважинных магнитометров, используемых в технологии наклонно-направленного бурения, подвержены искажениям из-за влияния геомагнитных бурь и суббурь. Наиболее сильно эти искажения проявляются в авроральных широтах. Настоящее исследование посвящено изучению влияния спорадических изменений магнитного поля во время геомагнитных бурь на ключевые параметры траектории бурения скважины при навигации по магнитному полю Земли. Исследуются закономерности отклонений параметров профиля скважины во время геомагнитных возмущений различной интенсивности в диапазоне от средних до высоких широт, в том числе для виртуальных месторождений, расположенных внутри и за пределами аврорального овала. На высоких географических широтах влияние на геометрические параметры ствола скважины становится критическим и приводит к их недопустимому отклонению. Таким образом, учет быстрых вариаций магнитного поля в реальном времени при помощи высокоточной магнитометрической аппаратуры является неотъемлемым элементом высокотехнологичной добычи углеводородного сырья в Арктике. Это придает исключительную актуальность задачам развертывания и поддержки стационарных геомагнитных обсерваторий в высокоширотных областях, а также развития интеллектуальных методов обработки геомагнитных измерений.

Ключевые слова: геомагнитное сопровождение бурения, наклонно-направленное бурение, магнитные обсерватории, ИНТЕРМАГНЕТ, Арктическая зона РФ, вариации магнитного поля, моделирование траектории бурения.

DOI: 10.31857/S0002333722020120

ВВЕДЕНИЕ

Знания о структуре, распределении и пространственно-временной изменчивости магнитного поля Земли не только дают фундаментальные представления о глубинном строении планеты и ее эволюции, но также служат важным источником информации в целом ряде прикладных задач. Так, данные о магнитном поле Земли нашли широкое применение в задачах навигации [Shockley, Raquet, 2014; Ogórek et al., 2015; Pasku et al., 2017]. Основной принцип действия навигационных систем, основанных на информации о магнитном поле, связан с фундаментальным свойством главного магнитного поля Земли (МПЗ), позволяющим определять ориентацию объекта в пространстве и направление на север-

ный магнитный полюс (СМП) Земли в любой заданной точке. Поскольку изменения главного МПЗ (вековые вариации, изменение магнитного момента земного диполя) характеризуются временными масштабами от десятков до тысяч лет, в навигационных задачах его можно считать практически неизменным во времени. Это делает информацию о магнитном поле ценным элементом навигации.

Навигация по магнитному полю широко используется в процессе т.н. наклонно-направленного бурения скважин при освоении месторождений полезных ископаемых [Гвишиани, Лукьянова, 2015]. Эта технология подразумевает бурение протяженных скважин, практически горизонтально входящих в нефтяную залежь, длина ство-

ла которых может составлять от 4–5 до более десятка километров [Short, 1993]. Данный процесс считается высокотехнологичным во многом из-за сложного пространственного профиля ствола при многоствольном и кустовом бурении. На Аляске, где эта технология была впервые применена компанией Шлюмберже, расстояние между плотно сгруппированными протяженными скважинами выдерживается в пределах сотни метров [Poedjono et al., 2013]. Это требует высокой точности позиционирования и навигации буровой колонны, которую способна обеспечить геомагнитная привязка. При этом толща земли никоим образом не препятствует такой навигации в отличие от использования глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Очевидно, эта технология широко востребована при добыче нефти и газа на шельфе, в том числе Арктическом, когда многоствольное бурение реализовано с суши, вдали от залежей ископаемого сырья. Например, в процессе нефтегазодобычи на шельфе Охотского моря, при прокладке рекордных по протяженности субгоризонтальных скважин, попадание в заданную точку под землей обеспечивается с погрешностью ± 3 м на расстоянии 15000 м от устья [Богоявленский, 2020].

Технология коррекции стволов нефтяных скважин по геомагнитным данным берет свое начало от подхода к коррекции космических платформ, разработанного в 60-х гг. прошлого столетия [Meurers, 1990]. Данные магнитометра, установленного в немагнитной части бурового снаряда, сравниваются с данными модели главного МПЗ, а в некоторых случаях – с данными магнитометра на поверхности [Buchanan et al., 2013; Гвишиани, Лукьянова, 2015; 2018]. Эта технология оказалась эффективнее, чем традиционная, основанная на коррекции траектории скважины с помощью гироскопического оборудования, которое требует остановки процесса бурения и извлечения бурового снаряда из скважины [Buchanan et al., 2013; Onovughe, Otobong, 2016].

Однако в силу того, что магнитное поле Земли бывает подвержено внешним воздействиям, вызванным вспышками на Солнце, коронарными выбросами масс и последующими геомагнитными бурями и суббурями, в эти периоды геомагнитная навигация становится затруднительной. Причем чем выше широта, тем эти воздействия становятся еще более интенсивными в силу дипольной конфигурации магнитосферы Земли. Во-первых, сами поля возмущения в приполярных областях сильнее, чем на низких широтах. Во-вторых, более слабая горизонтальная напряженность главного поля в высоких широтах приводит к тому, что горизонтальное возмущение постоянной силы имеет здесь более сильное влияние на склонение, чем на низких широтах.

На рис. 1 приведены среднечасовые данные вариаций магнитного склонения, полученные на высокоширотных геомагнитных обсерваториях сети ИНТЕРМАГНЕТ [St-Louis, 2012] Хорнзунд (IAGA-код HRN, архипелаг Шпицберген, Норвегия) и Соданкюля (SOD, Финляндия) во время сильной магнитной бури 29–30 октября 2003 г. [Гвишиани, Лукьянова, 2018]. На кривую, полученную за указанный период, наложены вариации склонения, полученные за магнитоспокойный период. Из рисунка видно, что размах вариаций при повышенной магнитной активности может достигать 10° , тогда как допустимые отклонения азимута ствола скважины при наклонно-направленном бурении не должны превышать $1–2^\circ$ [Гвишиани, Лукьянова, 2018]. Для учета столь сильных и продолжительных по времени вариаций требуется постоянный высокоточный мониторинг магнитного поля в месте бурения для обеспечения эталонных текущих значений и постоянной коррекции показаний магнитометра, установленного на буровой колонне.

Высокоточный мониторинг осуществляется геомагнитными обсерваториями стандарта ИНТЕРМАГНЕТ, магнитометры которых определяют изменения магнитного поля с точностью, значительно превышающей точность скважинных инклинометров. При геомагнитном сопровождении бурения обсерватория должна находиться в непосредственной близости от месторождения, однако на практике это далеко не так. Так, на сегодняшний день наблюдения обсерваторского класса, т.е. наблюдения полных значений трех компонент магнитного поля, в заполярном регионе нашей страны осуществляются на обсерваториях “Белое море” (IAGA-код WSE, республика Карелия) недалеко от западной границы РФ и “Мыс Шмидта” (IAGA-код CPS, Чукотский АО) на дальнем востоке. В последнее десятилетие коллективными усилиями научных организаций России был достигнут существенный прогресс в развитии пунктов геомагнитного мониторинга в высокоширотных регионах. В частности, активно ведется развитие обсерваторий “Остров Самойловский” (Республика Саха) и “Сабетта” на полуострове Ямал силами Геофизического центра РАН, Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН и компанией “Шлюмберже” [Гвишиани и др., 2018]. Тем не менее, степень покрытия Арктики магнитными обсерваториями, удовлетворяющими современным требованиям к регистрации и передаче данных, все еще оставляет желать лучшего. Основные сложности развития высокоточных пунктов наблюдений в Арктике связаны, прежде всего, с труднодоступностью региона, отсутствием требуемой инфраструктуры и необходимостью в постоянном персонале.

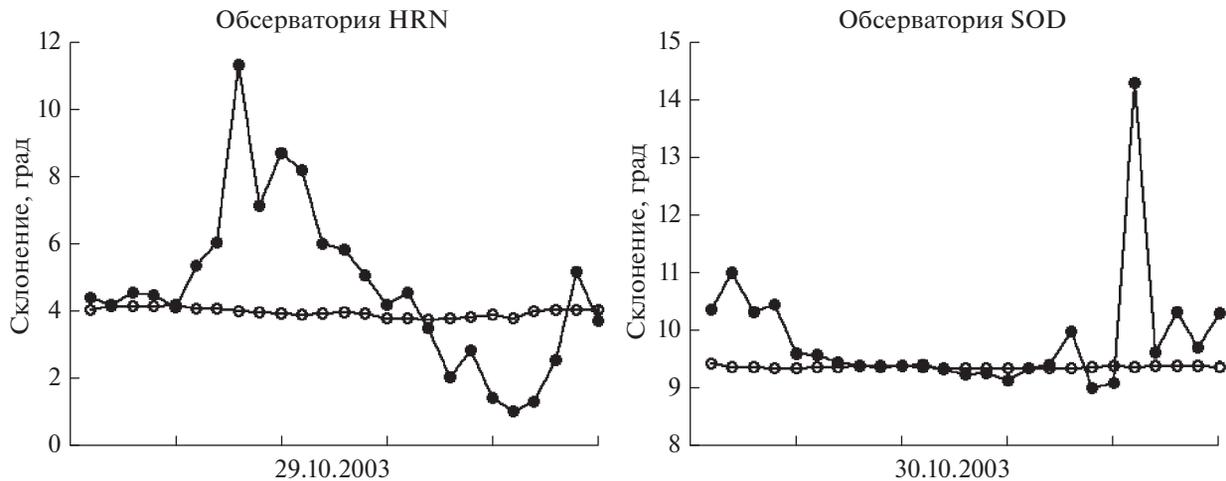


Рис. 1. Вариации магнитного склонения, зарегистрированные на обсерваториях Хорнзунд (HRN, Шпицберген, Норвегия) и Соданкюля (SOD, Финляндия). Черные точки соответствуют данным за период геомагнитной бури 29–30 октября 2003 г., белые – спокойному периоду.

Кроме того, вдоль всего северного морского пути РФ функционирует целый ряд магнитовариационных станций Росгидромет, обеспечивающих измерение относительных вариаций магнитного поля. Также в Ямало-Ненецком АО функционирует кластер из четырех магнитных станций, работа которых обеспечивается усилиями Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН. Однако для качественного геомагнитного сопровождения наклонно-направленного бурения таких данных недостаточно.

В настоящей работе нами выполнены численные эксперименты, позволяющие оценить влияние геомагнитных возмущений на ключевые параметры траекторий бурения скважин при навигации по геомагнитному полю. В качестве исходных данных были использованы реальные наблюдения магнитного поля за периоды нескольких магнитных бурь (2016–2018 гг.), полученные на обсерваториях и станциях в диапазоне от средних до высоких широт, включая таковые внутри и за пределами аврорального овала. Данное исследование развивает предыдущие результаты по этой тематике, изложенные в работах [Гвишиани, Лукьянова, 2015; 2018]. Также в статье продемонстрированы некоторые возможности аппаратно-программного комплекса (АПК) МАГНУС (Мониторинг и анализ геомагнитных аномалий в унифицированной среде) [Gvishiani et al., 2016], способствующие коррекции показаний скважинного магнитометра во время магнитных бурь.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ФАКТИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ СТВОЛА СКВАЖИНЫ

Основная задача при проведении наклонно-направленного бурения состоит в необходимой корректировке направления буровой колонны. Это осуществляется с помощью мониторинга фактической траектории скважины и ее отклонения от запланированной. Представление о фактическом профиле скважины получается из непрерывных, производимых в процессе бурения измерений угловых компонент магнитного поля скважинным магнитометром, установленным на конце буровой колонны. По измеренным значениям однозначно определяются истинный географический азимут ϕ и величина отклонения оси скважины от вертикали (зенитный угол α). Помимо углов, с помощью скважинных приборов каждые несколько десятков метров вдоль ствола регистрируются вертикальная глубина и общая длина скважины от устья до точки измерения L .

В качестве системы координат будем использовать прямоугольную систему координат x, y, z , где ось x направлена по географический север, y – на восток, ось z – вертикально вниз. Таким образом, с помощью датчиков телеметрии на буровой колонне мы будем исследовать изменение координат в данной прямоугольной системе, связанной с устьем скважины.

Проведем численный эксперимент, позволяющий нам понять, как будет отклоняться фактическая траектория бурения от проектной при навигации по магнитному полю во время сильных магнитных возмущений. Для этого представим себе, что бурение происходит в непосредственной близости от выбранной обсерватории, и скважинный инклинометр дублирует observa-

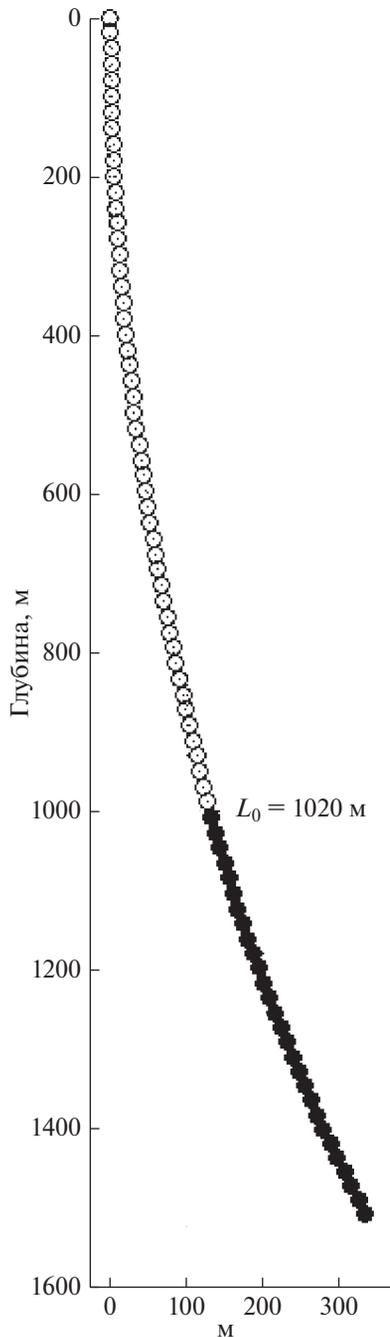


Рис. 2. Профиль модельной скважины в вертикальном разрезе. Черными кружками помечены контрольные точки, в которых производилась оценка параметров траектории бурения.

торские показания склонения. Примем следующие условия, приближенные к реальной практике бурения горизонтальных скважин [Кульчицкий и др., 2008]:

1) проектный азимут ϕ_{Π} прокладываемой скважины принимается равным нормальному значению магнитного склонения D_H согласно модели

IGRF [Thébault et al., 2015] для выбранной локации и эпохи;

2) фактический азимут скважины ϕ , непрерывно фиксируемый телеметрической системой, совпадает со среднечасовым склонением D , которое регистрируется на обсерватории в рассматриваемый период;

3) все измерения проводятся на участке скважины начиная с ее длины $L_0 = 1020$ м;

4) интервал между точками замеров составляет 20 м, которые буровая колонна проходит за 1 час;

5) зенитный угол α меняется равномерно между точками замера с шагом 0.5° от начального значения $\alpha_0 = 15.0^\circ$ на глубине $z_0 = 1008$ м.

Рассчитаем начальные координаты x_0 и y_0 при условии, что устье скважины находится в координатах $x = 0, y = 0, z = 0$. Изначально зенитный угол α положим равным нулю, затем каждые 20 м будем его увеличивать на 0.3° до требуемых 15.0° . Как раз с такими параметрами мы получим требуемые $L_0 = 1020$ м, $\alpha_0 = 15.0^\circ$ и $z_0 = 1008$ м для начала эксперимента. Профиль такой скважины в вертикальном разрезе показан на рис. 2. Именно *J*-образная скважина, представленная на рисунке, наиболее часто используется при горизонтальном кустовом бурении на шельфе. При таком типе скважин зенитный угол ствола постоянно растет, пока не достигнута проектная глубина или продуктивный пласт [Булатов и др., 2003].

Измерения производятся в ограниченном наборе точек, поэтому существуют различные способы получения координат траектории бурения между этими точками. Однако для скважины с пространственным искривлением, вне зависимости от частоты снятия замера, предпочтительнее применять при расчетах метод минимальной кривизны, как наиболее приближенно описывающий траекторию ствола скважины. Он является более точным по сравнению с методами, в которых траектория скважины рассматривается как совокупность отрезков прямых линий [Кондров, Шевелев, 2017]. Согласно этому методу [Близнюков и др., 2014; Построение..., 2010], приращения координат на отрезке ΔL в соседних предыдущей и последующей точках замера $i, i + 1$ вдоль длины ствола рассчитываются следующим образом:

$$\Delta y = T(\sin \alpha_i \sin \varphi_i + \sin \alpha_{i+1} \sin \varphi_{i+1}),$$

$$\Delta x = T(\sin \alpha_i \cos \varphi_i + \sin \alpha_{i+1} \cos \varphi_{i+1}),$$

$$\Delta z = T(\cos \alpha_i + \cos \alpha_{i+1}),$$

$$\text{где: } T = \frac{\Delta L \operatorname{tg} \frac{F}{2}}{F}$$

и

$$F = \arccos(\sin \alpha_i \sin \varphi_i \sin \alpha_{i+1} \sin \varphi_{i+1} + \sin \alpha_i \cos \varphi_i \sin \alpha_{i+1} \cos \varphi_{i+1} + \cos \alpha_i \cos \alpha_{i+1}).$$

В указанных формулах значения α и φ указываются в градусах, значение F – в радианах.

По приращениям координат далее рассчитываются текущие координаты y , x , z и геометрические параметры скважины: горизонтальное смещение A и азимут смещения Ψ для i -й точки скважины от ее устья:

$$y_{i+1} = y_i + \Delta y, \quad x_{i+1} = x_i + \Delta x, \quad z_{i+1} = z_i + \Delta z,$$

$$A_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}, \quad \Psi_i = \arctg \frac{y_i}{x_i}.$$

Угол пространственного искривления ствола скважины $\Delta\gamma$ на интервале $(i, i + 1)$ и интенсивность искривления ствола скважины J на интервале между точками измерений рассчитываются по следующим формулам:

$$\Delta\gamma_i = \arcsin \sqrt{[\sin \alpha_{i+1} \cos \alpha_i \cos(\varphi_{i+1} - \varphi_i) - \sin \alpha_i \cos \alpha_{i+1}]^2 + \sin^2 \alpha_{i+1} \sin^2(\varphi_{i+1} - \varphi_i)},$$

$$J_i = 10 \frac{\Delta\gamma_i}{\Delta L},$$

где J_i – интенсивность искривления на участке ΔL , градус/10 м.

Все указанные величины рассчитывались параллельно для проектного профиля скважины за невозмущенный период ($\varphi_{\Pi} = D_H$), и фактического профиля за период возмущенного поля ($\varphi = D$) для оценки их расхождений. Кроме того, на каждом шаге i оценивалось отклонение фактического положения от проектного:

$$S_i = \sqrt{(y_i - y_{\Pi,i})^2 + (x_i - x_{\Pi,i})^2 + (z_i - z_{\Pi,i})^2}.$$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ГЕОМАГНИТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Для оценки отклонения фактической скважины от проектной при бурении во время геомагнитных бурь суммарно были рассмотрены данные четырнадцати геомагнитных обсерваторий и станций на территории РФ (табл. 1). В табл. 1 приведен их перечень с указанием типа каждого пункта наблюдений: “О” соответствует обсерватории, “С” – станции. Для каждой локации указано нормальное (невозмущенное) значение склонения D_H за 2016–2018 гг. Выбранный набор пунктов наблюдений дает возможность исследовать закономерности отклонений параметров скважин в широком пространственном диапазоне от средних до высоких широт (станции и обсерватории в табл. 1 упорядочены по убыванию географической широты). Отдельно необходимо подчеркнуть, что некоторые из рассматриваемых станций расположены в пределах аврорального овала, вблизи его экваториальной и полярной границ, а также северней его полярной границы (рис. 3).

Рассматриваемые среднеширотные обсерватории YAK, MGD, NVS, PET, IRT и КНВ, функционирующие при содействии институтов РАН, входят в международную сеть ИНТЕРМАГНЕТ, обеспечивая тем самым наиболее точные наблю-

дения магнитного поля. В реальной практике бурения только такие данные укладываются в допустимые погрешности и поэтому могут быть использованы в качестве эталонных при навигации по магнитному полю. Также рассматривались данные обсерватории CPS, развиваемой Институтом космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН [Khomutov, 2018]. Все указанные обсерватории входят в российский сегмент геомагнитных наблюдений [Гвишиани и др., 2018] и обеспечивают передачу данных в ЦКП “Аналитический центр геомагнитных данных” ГЦ РАН (<http://geomag.gcras.ru>).

Поскольку с ростом широты усиливается влияние приполярных электроджетов на наземные вариации магнитного поля, к рассмотрению были добавлены данные высокоширотных магнитовариационных станций VIZ, KTN, DIK, TIK, RBK и AMD. Работа этих станций поддерживается Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом Росгидромет, а данные доступны через веб-портал сети SuperMAG (<https://supermag.jhuapl.edu/>). Также рассматривались данные станции KHS, входящей в кластер пунктов наблюдений Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН на территории Ямало-Ненецкого АО [Салихов и др., 2010; Зайцев, Лобанов, 2018].

Обсерваторские данные представляют собой временные ряды полных значений трех компонент магнитного поля X (северная компонента), Y (восточная компонента) и Z (вертикальная компонента). В нашей задаче, требующей абсолютные среднечасовые значения магнитного склонения D , расчет производился по формуле:

$$D(t) = \arctg(Y(t)/X(t)),$$

где t – временной отсчет с шагом 1 мин.

Сложнее выглядит ситуация при работе с данными магнитных станций, предоставляющих

Таблица 1. Геомагнитные обсерватории и станции, данные которых использовались в исследовании

№	Код	Тип	Название	Географические координаты, град		Геомагнитные координаты, град		D_H , град
				широта	долгота	широта	долгота	
1	VIZ	С	Визе	79.48	76.98	74.7	156.12	44
2	KTN	С	Котельный	75.94	137.71	70.98	-157.19	-16.2
3	DIK	С	Диксон	73.55	80.57	69.36	156.64	30.8
4	TIK	С	Тикси	71.58	129	66.7	-161.29	-17.1
5	KHS	С	Харасавей	71.16	66.83	63.02	152.27	29
6	PVK	С	Певек	70.1	170.9	65.94	-128.74	-2.15
7	AMD	С	Амдерма	69.5	61.4	65.85	138.2	26.7
8	CPS	О	Мыс Шмидта	68.878	-179.37	64.41	-126.51	2.7
9	YAK	О	Якутск	60.02	129.72	54.88	-157.4	-20.2
10	MGD	О	Магадан	59.97	150.86	54.3	-139.32	-13.45
11	NVS	О	Новосибирск	55.03	82.9	51.26	156.55	8.25
12	PET	О	Паратунка	52.97	158.25	46.73	-132.07	-6.1
13	IRT	О	Иркутск	52.17	104.45	47.79	178.45	-3.55
14	KHB	О	Хабаровск	47.61	134.69	41.44	-151.91	-12.75

лишь вариации компонент поля относительно некоторого “плавающего” базисного уровня. По таким данным возможно восстановление только приближенных полных значений поля, включая магнитное склонение. В нашей задаче оценки относительных отклонений профиля скважины от проектного таких приближенных значений будет достаточно, однако в реальной практике бурения, требующей подлинного знания азимута, их точность неприемлема. Ниже приведем описание процедуры восстановления приближенных значений магнитного склонения по данным вариаций силовых компонент dH (вдоль направления на магнитный север) и dE (вдоль направления на магнитный восток).

За рассматриваемые суточные промежутки времени брались исходные данные dH и dE за вычетом среднесуточного базисного уровня. Согласно последней версии модели IGRF [Thébault et al., 2015] в геодезических координатах (широта, долгота, высота) расположения каждой станции для рассматриваемой эпохи определялись нормальные значения горизонтальной компоненты H_0 и склонения D_0 магнитного поля. Для расчета вариации магнитного склонения $dD(t)$ использовалась следующая формула:

$$dD(t) = \arctg\left(\frac{dE(t)}{H_0 + dH(t)}\right).$$

Полное магнитное склонение рассчитывалось следующим образом:

$$D(t) = D_0 + dD(t).$$

Среднечасовые значения были получены усреднением с коэффициентами фильтра Гаусса, используемого при подготовке данных ИНТЕРМАГНЕТ [Jankowski, Sucksdorff, 1996; St-Louis, 2012]. При усреднении используются значения с 0 по 59 минуте часа, коэффициенты фильтра центрированы на 30 минуте:

$$f(t) = e^{-\frac{\left(\frac{(30-t)}{15.90062182}\right)^2}{2}}.$$

Нормировка коэффициентов фильтра выполняется с учетом процента доступных данных. При потерях, превышающих 10% в течение часа, соответствующее среднечасовое значение принимается отсутствующим.

В качестве периодов возмущенного магнитного поля нами рассматривались четыре магнитные бури, произошедшие на фазе спада активности 24-го солнечного цикла с 2016 по 2018 гг. Информация об указанных бурях приведена в табл. 2. В таблице также указаны соответствующие им максимальные значения двух индексов геомагнитной активности: планетарного индекса Dst , характеризующего интенсивность кольцевого тока, и индекса авроральных электроджетов AE . Подчеркнем, что все рассматриваемые бури являлись умеренными и не носили экстремальный характер.

По исходным данным среднечасовых значений склонения для каждого пункта наблюдений в течение каждой из отмеченных бурь был выделен суточный интервал с максимальной активностью. Выбранные таким образом интервалы указаны в правом столбце табл. 2. В случае высоко-

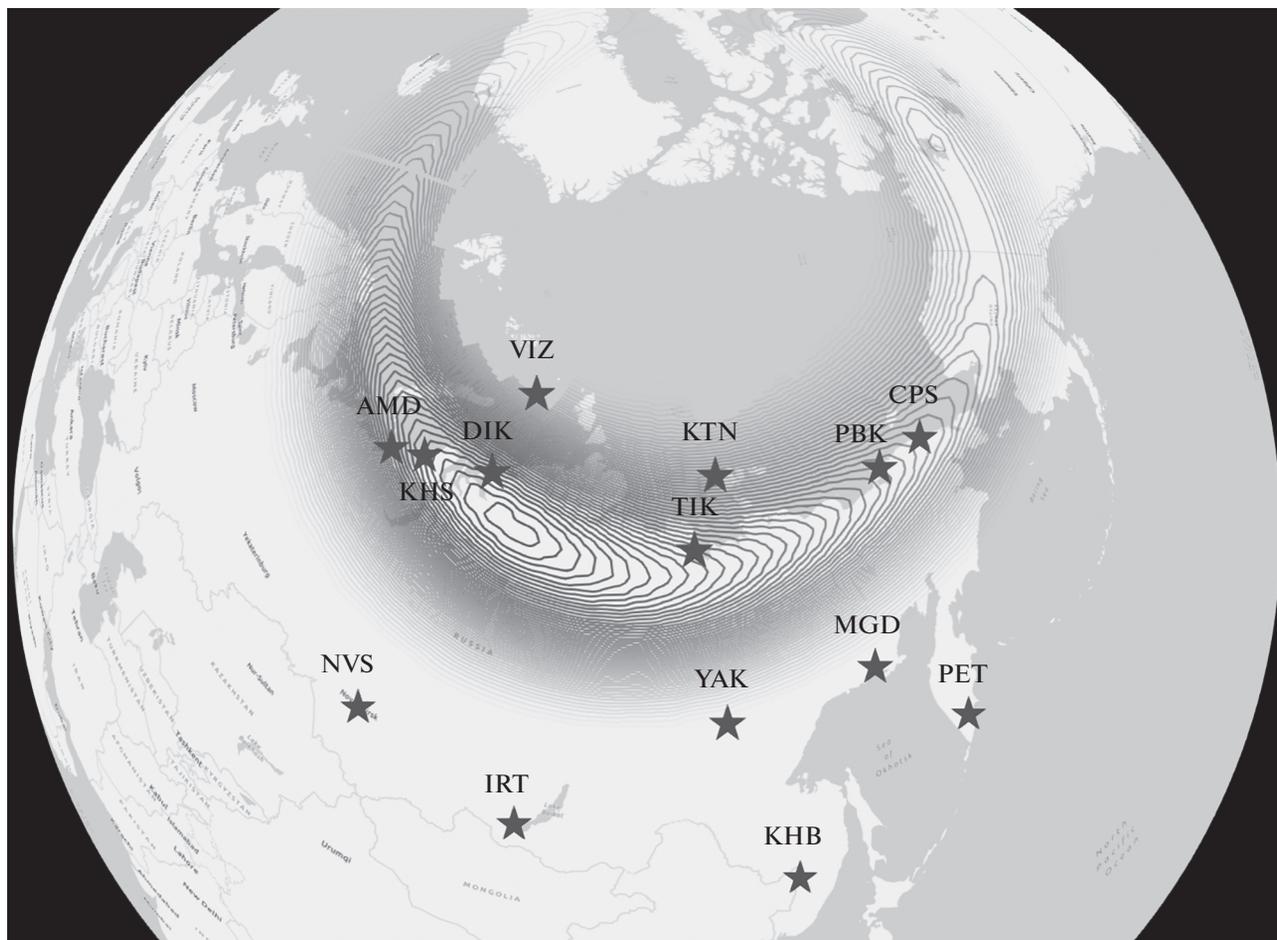


Рис. 3. Карта рассматриваемых обсерваторий и станций, помеченных звездами. Авроральный овал построен согласно эмпирической модели OVATION [Newell et al., 2014], соответствующий веб-сервис доступен по адресу <http://aurora-forecast.ru/> [Vorobev et al., 2020]. Показано положение овала на 24.12.2020 г., 16:00 UT.

широтных станций основная часть возмущений, отобранных для рассмотрения, связана с интенсификацией авроральных электроджетов на фоне суббулевой активности. В случае среднеширотных обсерваторий рассматриваемые возмущения геомагнитного поля в большей степени ассоциированы с основной фазой магнитных бурь.

ОЦЕНКА ОТКЛОНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СКВАЖИН ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ШИРОТЫ

На рис. 4 показаны наиболее критичные параметры, характеризующие траекторию бурения наклонно-направленной скважины. В качестве примера представлены результаты, полученные

Таблица 2. Информация о рассматриваемых геомагнитных бурях и выбранные для исследования суточные интервалы

№	Период бури	Dst_{\max} , нТл	AE_{\max} , нТл	Рассматриваемый интервал
1	06–08.03.2016	–98	1428	AMD, CPS, PBK: 06.03.2016 Остальные: 07.03.2016
2	12–14.10.2016	–104	1992	13.10.2016
3	06–11.09.2017	–124	2677	AMD: 07.09.2017 Остальные: 08.09.2017
4	25–28.08.2018	–174	2200	ТИК: 27.08.2018 Остальные: 26.08.2018

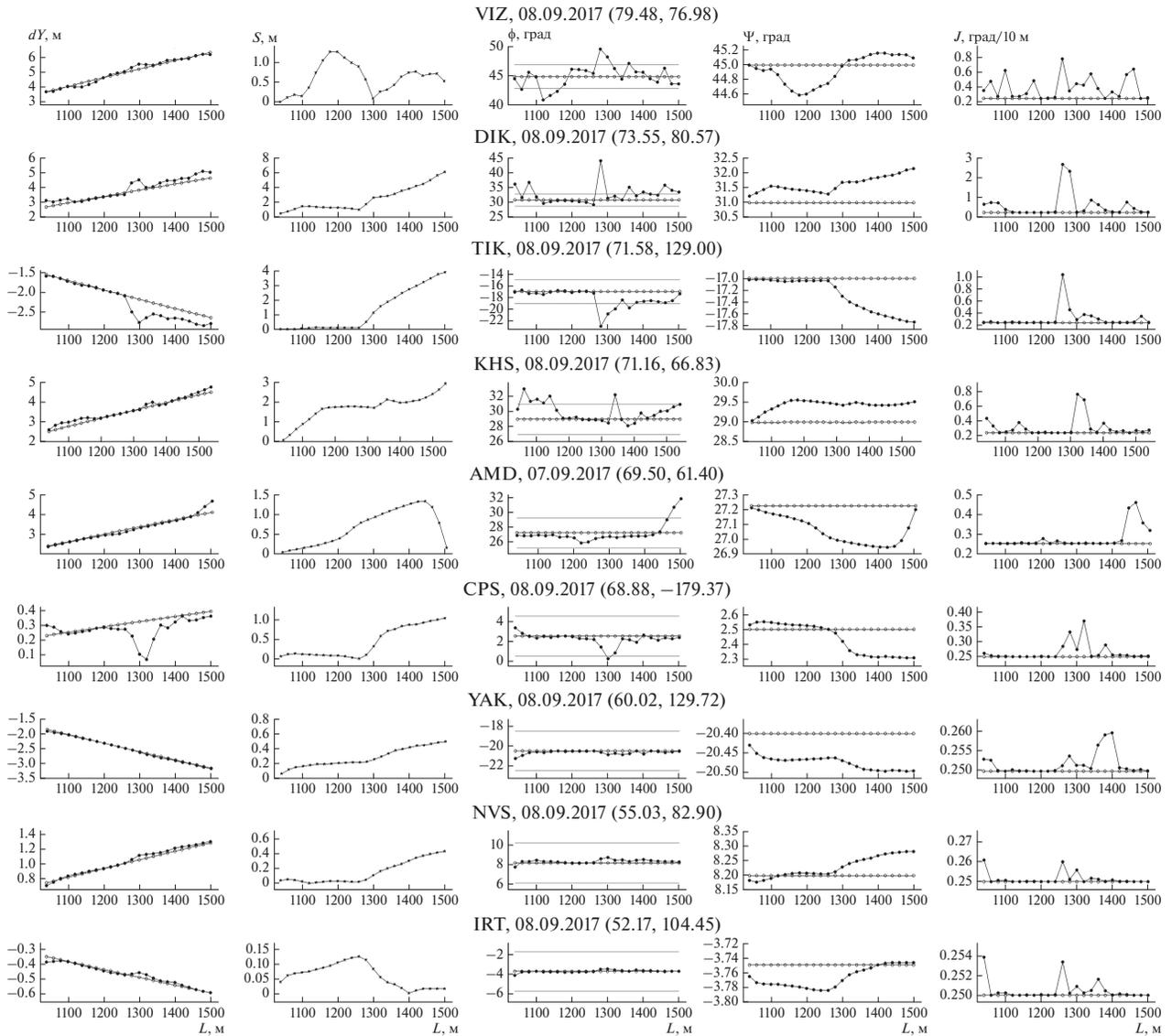


Рис. 4. Траекторные параметры модельной скважины вдоль длины ствола L (горизонтальная ось) при бурении во время магнитной бури 06–11.09.2017 г. (слева направо): приращение координаты y (dy , м), отклонение от проектных координат (S , м), азимут скважины (ϕ , град), азимут смещения (Ψ , град) и интенсивность искривления на 10 м (J , град/10 м). Проектные значения параметров показаны белыми кружками, фактические – черными. На графиках азимута скважины горизонтальными линиями показаны предельно допустимые отклонения. Сверху вниз графики упорядочены по убыванию широты пунктов наблюдений, данные которых использовались для расчета фактических параметров скважины. Географические координаты (широта и долгота) указаны в скобках. Каждый график отражает значения, полученные в течение одних суток, что соответствует примерно 500 м прокладки скважины.

во время магнитной бури 06–11.09.2017 г. (для каждого пункта наблюдений рассмотрен суточный период согласно табл. 2). Подробное описание представлено в подписи к рисунку.

Аналогичные данные были получены для всех рассматриваемых пунктов наблюдений по всем четырем бурям. К сожалению, не для всех четырех бурь имелись полные наборы данных по всем 14 пунктам наблюдений. Сравнение графиков фактических траекторных параметров скважины с проектными параметрами за невозмущенный

период показывает, что с ростом широты по большинству из ключевых параметров увеличивается расхождение планового и фактического профилей. Существенные отклонения траекторных параметров скважины от спокойного уровня с увеличением широты особенно заметны для S , ϕ , Ψ , J и в меньшей степени для dy .

Необходимо подчеркнуть, что такие расхождения были продемонстрированы на примере небольшого 500-метрового отрезка скважины, проложенного всего за 1 сут. Ввиду интенсивной из-

менчивости магнитного поля в высоких широтах как во времени, так и по пространству, подобные отклонения могут наблюдаться неоднократно за все время прокладки скважины. Наиболее критичны такие расхождения для угла азимута скважины (ϕ) и интенсивности искривления ствола на 10 м (J). Так, на высоких широтах (в местах установки станций VIZ, KTN, DIK, TIK, KHS и AMD) фактические азимутальные углы скважины принимают недопустимые значения за периоды всех исследуемых магнитных бурь.

Для получения обобщенной оценки влияния широты на отклонения рассматриваемых параметров скважины по каждому из них для каждого пункта наблюдений и бури были посчитаны следующие статистические показатели: норма L1, норма L2, максимальное отклонение за рассматриваемый период и среднеквадратичное отклонение (СКО). На рис. 5 приведены графики распределения нормы L1 для бури № 1, нормы L2 для бури № 2, максимальных отклонений для бури № 3 и СКО для бури № 4, упорядоченных по убыванию широты. На графиках с максимальными отклонениями (рис. 5в) горизонтальной чертой показаны максимально допустимые отклонения для соответствующих параметров скважины, принятые в практике бурения. Следует отметить, что общий ниспадающий тренд с уменьшением широты наблюдается по каждому из статистических показателей практически для каждого из параметров скважины во время всех четырех бурь.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Гистограммы нормы L1, построенные для бури № 1 (рис. 5а), указывают на достаточно резкое (в некоторых случаях – на порядок) возрастание значений траекторных параметров скважины при движении от низких широт к высоким для таких параметров, как $d\gamma$, S и Ψ , начиная с широты пункта наблюдений KHS. Для тех же параметров, за исключением $d\gamma$, аналогичное резкое возрастание наблюдается на гистограммах нормы L2, демонстрирующих результаты для бури № 2 (рис. 5б). Данную закономерность в широтных распределениях значений можно объяснить существенной разницей в уровне геомагнитной возмущенности в зоне полярных сияний, определяемой в этой зоне главным образом эффектом ионосферных токов, по сравнению с геомагнитной возмущенностью в более низких широтах. На гистограммах для нормы L1 невозможно выделить какие-либо четкие закономерности отдельно для значений в высокоширотном и низкоширотном интервалах. Для нормы L2 наблюдается очень слабо выраженный убывающий тренд с понижением широты для значений, находящихся в диапазоне низких широт, тогда как для высокоширотного сегмента

какой-либо закономерности не прослеживается, как и в аналогичных значениях нормы L1.

В отличие от статистических показателей норм L1 и L2, распределения которых по широте тяготеют к “ступени” при переходе через авроральный овал, обобщенные широтные зависимости максимальных отклонений траекторных параметров скважины от проектных в период бури № 3 (рис. 5в) имеют характер распределений с ярко выраженным пиком, который соответствует широте пункта DIK. Почти для всех из них характерен близкий к экспоненциальному спад, продолжающийся в низкоширотной области и наиболее явно выраженный для параметров S , Ψ и J . На гистограмме для азимута скважины в период бури № 3 видно, что превышение допустимого отклонения в период геомагнитного возмущения начинается уже на широтах выше пункта наблюдений YAK (60° с.ш.). При этом критическое превышение параметра интенсивности искривления ствола на 10 м начинается после 71° с.ш. (обсерватория TIK).

Для СКО рассматриваемых параметров (рис. 5г) также в ряде случаев характерны пиковые значения в высокоширотном интервале. Пиковые значения СКО для обобщенных широтных зависимостей S и Ψ вновь приурочены в основном к широте пункта KHS, а для обобщенной широтной зависимости параметра J – к широте станции TIK. Пиковые значения гистограмм, вероятно, также соответствуют границе аврорального овала на рассматриваемый момент времени. Для параметров $d\gamma$ и ϕ СКО стремительно набирают рост при переходе к высокоширотному сегменту, а в низкоширотном интервале они падают до минимальных величин и в нем остаются практически неизменными.

По результатам анализа всех полученных гистограмм было обнаружено, что общий ниспадающий тренд с уменьшением широты наблюдается по каждому из статистических показателей практически для каждого из параметров скважины во время всех четырех бурь. При этом, при переходе в низкоширотную область по всем статистическим показателям в целом характерна смена тренда на горизонтальный с минимальными значениями отклонений.

Практически во всех случаях, когда на широтных зависимостях виден хорошо выраженный пик, он находится на широтах расположения пунктов наблюдений DIK, TIK или KHS, примерно соответствующих положениям аврорального овала. Однако ввиду некоторой изменчивости положения овала во времени, а также ввиду пространственной и временной изменчивости геомагнитных возмущений, вызываемых приполярными электроджетами, пики широтных зависимостей меняются не только для разных бурь, но

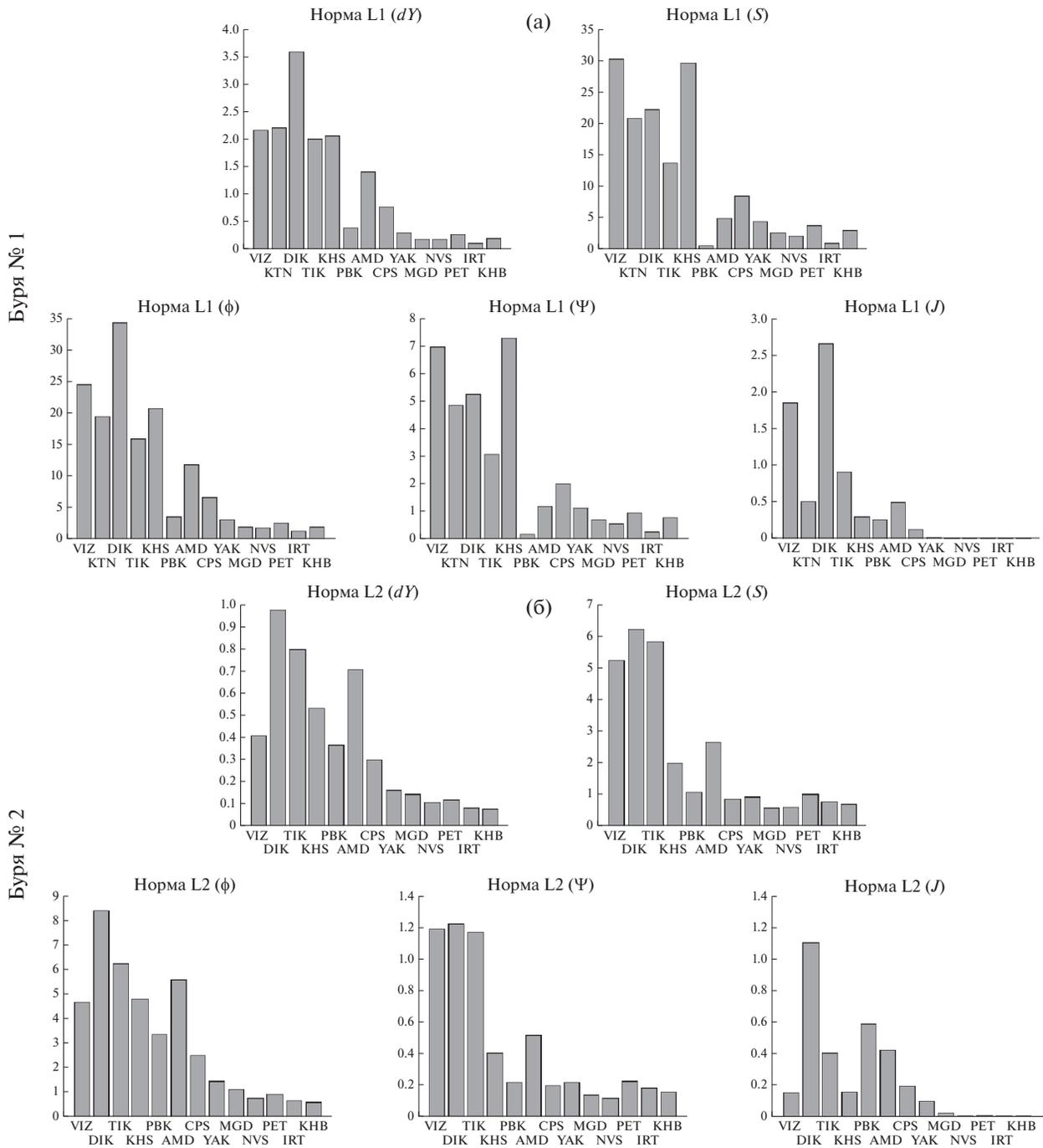


Рис. 5. Обобщенные статистические показатели, полученные для каждого параметра скважины (dy , S , ϕ , Ψ , J), пункта наблюдений и бури: норма L1 для бури № 1 (а); норма L2 для бури № 2 (б); максимальные отклонения для бури № 3 (в) и СКО для бури № 4 (г). По горизонтальной оси пункты наблюдений упорядочены по убыванию широты. На графиках с максимальными отклонениями (в) горизонтальной чертой показаны максимально допустимые отклонения для соответствующих параметров скважины.

и для разных параметров в период одной бури (например, пиковое значение СКО параметра J на рис. 5г). Также в отдельных случаях для широты расположения самой северной станции из всех рассматриваемых пунктов наблюдений – VIZ – отклонения получались меньше, чем на располо-

женных ниже по широте (DIK, TIK, KHS...). Данное обстоятельство можно объяснить относительной удаленностью данной станции от аврального овала и, следовательно, меньшей подверженности воздействию магнитного поля ионосферных токов.

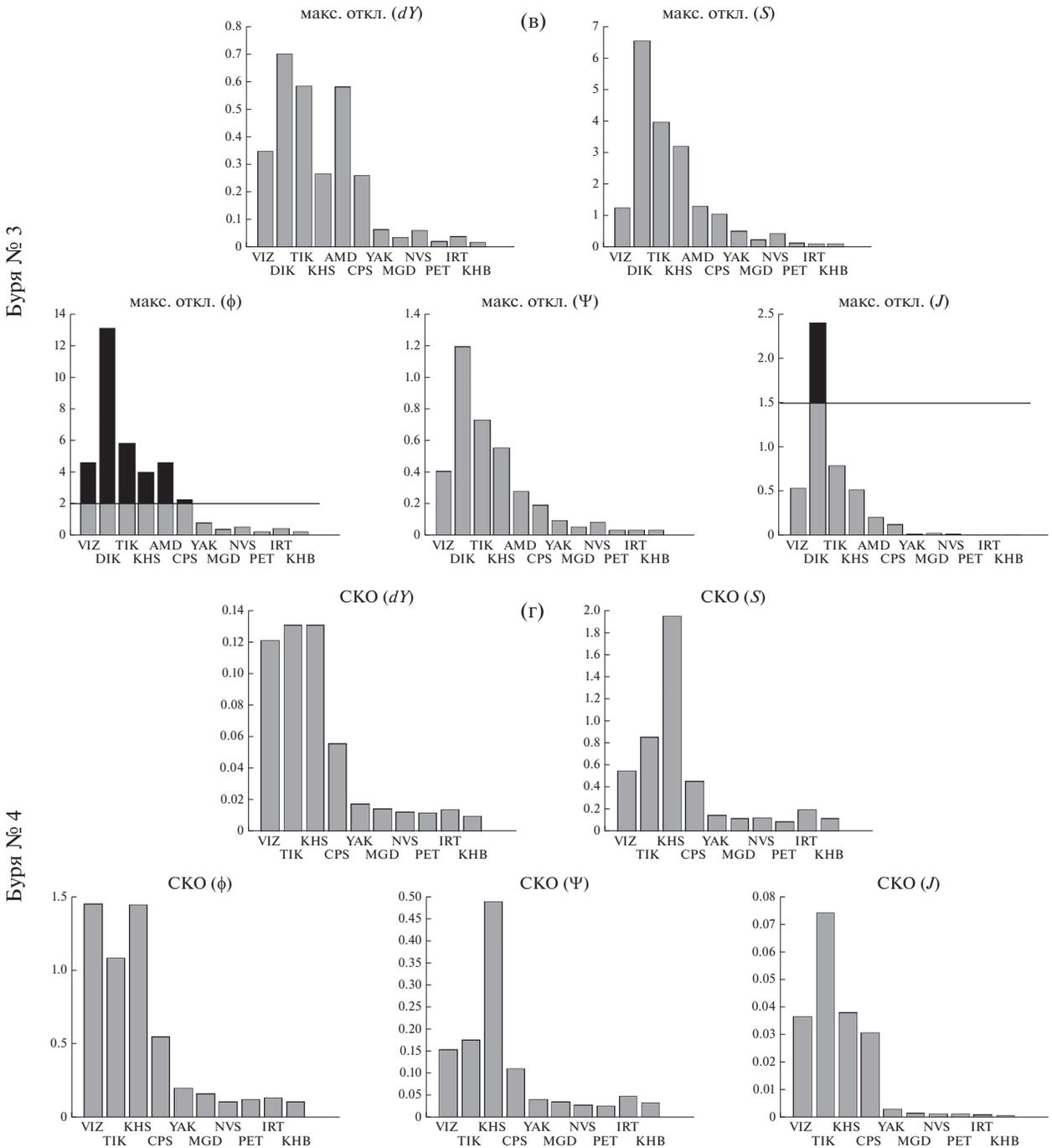


Рис. 5. Окончание.

Горизонтальные скважины с большим радиусом кривизны могут быть сооружены при кустовом бурении на суше и море, а также при бурении одиночных скважин со значительной протяженностью горизонтального участка. Для таких скважин используются стандартная техника и технология направленного бурения, позволяющая создать максимальную интенсивность искривления (0.7°–2° на 10 м проходки). Интенсивность ис-

кривления в обычном случае не должна превышать 1.5°/10 м проходки [Булатов и др., 2003]. На рассмотренных примерах видно, что соответствующие значения выходят за допустимые пределы погрешности (обозначены горизонтальными линиями на рис. 5в). На высоких широтах интенсивность искривления ствола на 10 м достигает величины почти 2.5 градусов на 10 м, что на практике недопустимо. Как уже отмечалось выше,

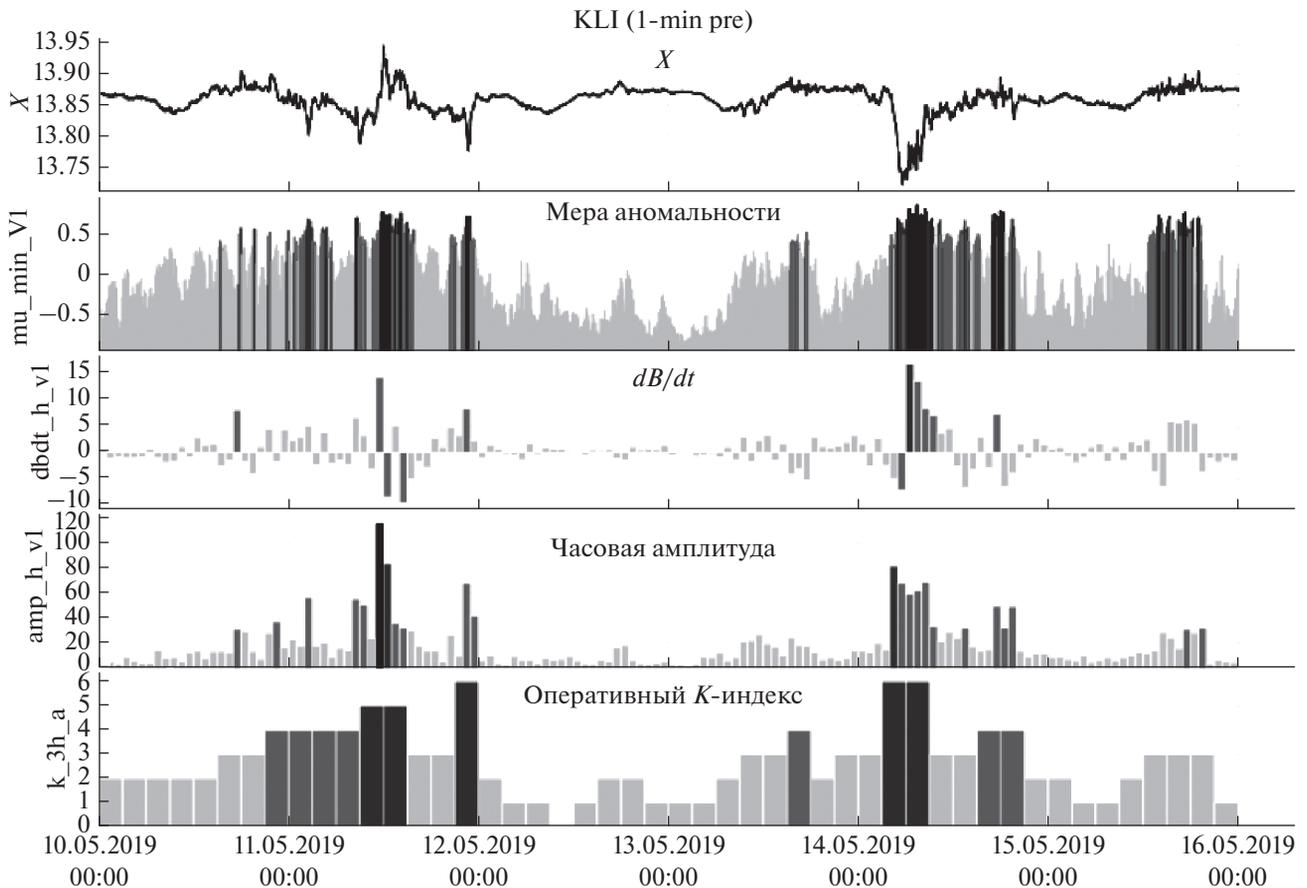


Рис. 6. Пример многокритериального распознавания магнитной активности в реальном времени по исходным наблюдательским данным (верхний график), поступающим в ЦКП “Аналитический центр геомагнитных данных”: обсерватория “Климовская” (Архангельская обл.), событие 11–15 мая 2019 г. (<http://geomag.gcras.ru>). Светло-серый цвет соответствует фоновым значениям исходной магнитограммы, серый – слабым аномалиям, темно-серый – аномалиям, черный – сильным аномалиям.

другой параметр, принимающий недопустимые значения в высоких широтах – это фактический азимут скважины. За периоды всех исследуемых магнитных бурь его значения выходили за рамки допуска практически на всех высокоширотных станциях (например, см. рис. 5в).

Для учета быстрых вариаций магнитного поля Земли, о которых идет речь в статье, в ЦКП “Аналитический центр геомагнитных данных” реализован комплекс математических алгоритмов, позволяющих в автоматическом режиме и в реальном времени проводить распознавание магнитной активности по исходным данным [Gvishiani et al., 2016; Гвишиани и др., 2018]. На рис. 6 приведен пример многокритериального распознавания по данным обсерватории “Климовская” [Соловьев и др., 2016] с использованием алгоритмов искусственного интеллекта. На верхнем графике представлен исходный ряд данных компоненты X за период магнитной бури, а на втором графике – разработанная мера аномальности, маркирующая аномальные фрагменты на

исходной записи [Soloviev et al., 2016]. На третьем, четвертом и пятом графиках показаны дополнительные индикаторы геомагнитной активности: скорость изменения поля, максимальная амплитуда в часовом окне и оперативный K -индекс геомагнитной активности. Указанные алгоритмы являются частью АПК МАГНУС, который представляет собой ядро аналитического центра [Gvishiani et al., 2016]. Полученная информация может быть использована при коррекции показаний магнитометра, установленного на буровой колонне, во время магнитных бурь.

В работе [Соловьев, Смирнов, 2018] описана современная методика автоматизированного отбора магнитоспокойных дней как в региональном (для индивидуальной обсерватории), так и в глобальном (по всей совокупности мировых обсерваторий) масштабе. Данная методика также связана с уже упомянутым алгоритмом построения меры аномальности [Ощенко и др., 2020] и обеспечивает идентификацию магнитоспокойных дней с задержкой менее суток. Продемонстриру-

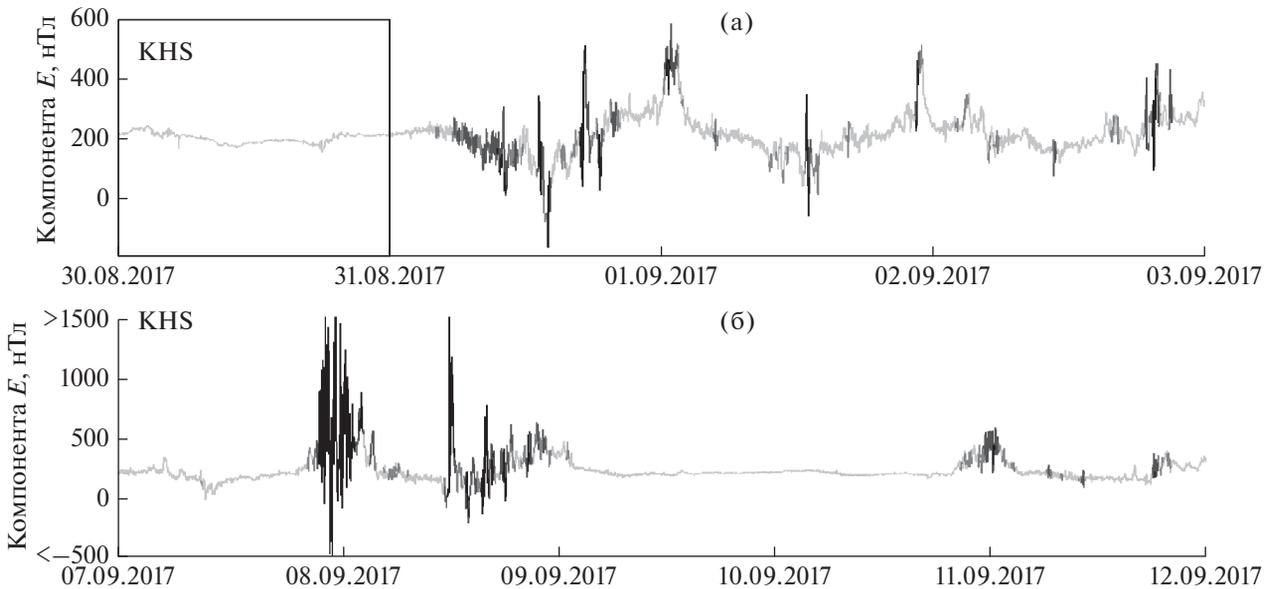


Рис. 7. Маркировка исходных значений (данные компоненты E) системой распознавания геомагнитной активности АПК МАГНУС на станции KHS за 30.08–02.09.2017 г. (а); 07–11.09.2017 г. (б); 30.08.2017 г. был определен системой как последний магнитоспокойный день перед началом бури 07.09.2017 г. (помечен прямоугольником). Цветовые обозначения соответствуют значениям меры аномальности и аналогичны рис. 6.

ем работу системы, объединяющей указанные алгоритмы распознавания магнитной активности и магнитоспокойных дней, на примере данных обсерватории KHS за сентябрь 2017 г., в течение которого произошла буря № 3 (табл. 2). На момент начала бури (07.09.2017 г.) последним магнитоспокойным днем, определенным системой, являлось 30 августа (рис. 7а, прямоугольная область). Из рисунка видно, что все минутные значения за этот день были классифицированы как фоновые (светло-серый цвет). Позже все экстремальные проявления магнитной бури, основная фаза которой пришлась на 7–8 сентября, были успешно выделены на исходных данных системой распознавания магнитной активности (рис. 7б, темно-серый и черный цвета). Именно они привели к недопустимым отклонениям фактического азимута скважины (ϕ), проиллюстрированным на рис. 4 и рис. 5. Таким образом, на каждый момент времени оператор имеет полную и актуальную информацию как о текущем уровне магнитной активности, так и о спокойном уровне магнитного поля, характерном для данного региона и времени. Эти данные дают возможность оперативной оценки отклонений поля от его спокойного уровня для дальнейшего принятия решений. Рассчитанные параметры скважины за 30.08.2017 г. представлены на рис. 8. Из рисунка видно, что отклонения от плановых параметров в этом случае минимальны, что демонстрирует эффективность автоматизированной системы распознавания АПК МАГНУС.

Во всех приведенных примерах при расчете проектируемых параметров профиля мы для простоты использовали квазипостоянное значение нормального склонения, вычисленное по модели IGRF, и исходили из того, что все возмущения вызваны исключительно проявлениями космической погоды. При этом неприемлемыми считались значения азимута, лежащие за пределами допустимых отклонений (рис. 4, рис. 5в). На практике же геомагнитные данные скважинной инклинометрии также существенно отягощены сбоями измерительной системы, внешним воздействием от соседних стволов скважин, магнитных минералов в буровом растворе, намагниченных пород и других аномалий [Poedjono et al., 2013]. В таких условиях первоочередной задачей является контроль качества получаемых с бура данных, предполагающий их коррекцию с учетом указанных аномалий. Это достигается путем их непрерывного сравнения с эталонными данными магнитной обсерватории, расположенной поблизости. Для верификации поступающих с буровой колонны геомагнитных измерений и, в конечном итоге, повышения точности геомагнитной привязки на практике в качестве референсных используются не квазипостоянные значения, а регистрируемые на обсерватории данные склонения. В этом случае предельно допустимые отклонения отсчитываются от фактических значений, изменчивых во времени.

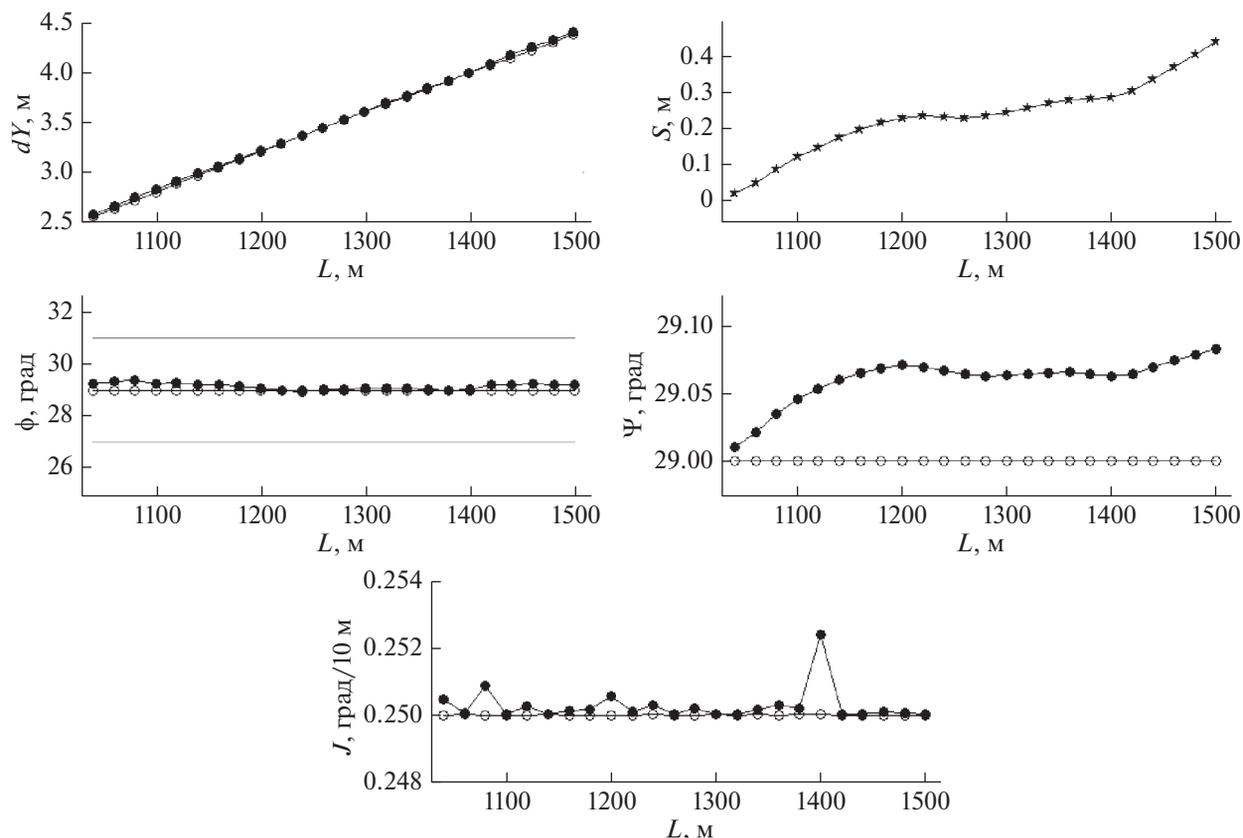


Рис. 8. Параметры модельной скважины по данным станции KHS за магнитоспокойный период 30.08.2017 г. Обозначения аналогичны рис. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокотехнологичные подходы к освоению природных ресурсов требуют привлечения последних достижений в области метрологии, математического моделирования, методов обработки больших объемов данных и их интерпретации. Наклонно-направленное бурение во многом основано на высокоточных измерениях вариаций МПЗ как по пространству, так и во времени, и их дальнейшем анализе.

Результаты описанных в статье численных экспериментов по моделированию траекторных параметров скважины в период магнитных бурь наглядно иллюстрируют влияние геомагнитных возмущений на ход наклонно-направленного бурения. Практически для всех рассмотренных бурь в период максимума возмущений с ростом геомагнитной широты наблюдается рост проанализированных статистических характеристик параметров ствола скважины и их отклонений. В отдельных случаях заметно резкое возрастание при переходе через границу аврорального овала. Для максимальных и среднеквадратических отклонений статистических характеристик траекторных

параметров отчетливо выражены пики на широте, соответствующей положению аврорального овала. Во всех рассмотренных случаях статистические величины демонстрируют высокие значения в высокоширотном сегменте и значительно более низкие — в интервале средних и низких широт.

Отклонения фактических параметров скважины от проектных были продемонстрированы на примере небольшого 500-метрового отрезка скважины, проложенного всего за 1 сут. Ввиду интенсивной изменчивости магнитного поля в высоких широтах как во времени, так и по пространству, подобные отклонения могут наблюдаться неоднократно за все время прокладки скважины. Наиболее критичны такие расхождения для угла азимута скважины (ϕ) и интенсивности искривления ствола на 10 м (J).

Было показано, что на высоких широтах (в местах установки станций VIZ, KTN, DIK, TIK, KHS и AMD) фактические азимутальные углы скважины принимают недопустимые отклонения (превышающие 2 градуса от проектного значения) за периоды всех исследуемых магнитных бурь. Также на рассмотренных примерах видно,

что на высоких широтах интенсивность искривления ствола на 10 м достигает величины почти 2.5 градусов на 10 м, что на практике недопустимо.

Стоит отметить, что определяющее влияние на исходные данные и результаты моделирования во всех случаях имела степень изменчивости магнитного склонения во время геомагнитных возмущений, которая может быть существенной даже когда общая интенсивность рассматриваемой магнитной бури невысока по сравнению, к примеру, с сильнейшими бурями солнечного цикла.

Таким образом, наклонно-направленное бурение скважин требует надежного контроля ориентации буровой колонны под землей, и особенно строгий контроль требуется при бурении в Арктическом регионе. Учет быстрых вариаций магнитного поля в реальном времени при помощи высокоточной магнитометрической аппаратуры является неотъемлемым элементом при высокотехнологичной добыче углеводородного сырья в Арктике. Ключевой идеей решения проблемы контроля параметров наклонно-направленного бурения является параллельный независимый мониторинг геомагнитных вариаций на обсерваториях, расположенных непосредственно в районе бурения, с привлечением современных математических методов анализа данных в реальном времени.

В работе было показано, как геомагнитные воздействия космической погоды влияют на данные подземной инклинометрии. Однако в реальной практике буровых работ присутствуют и другие источники, которые существенным образом искажают получаемые измерения. К ним, в первую очередь, относятся намагниченные породы, неизбежно присутствующие вдоль прокладываемой трассы, и соседние скважины при кустовом бурении. Порождаемые ими магнитные возмущения должны быть безусловно учтены, а получаемые измерения должным образом скорректированы для корректной навигации по геомагнитному полю. В этой связи эталонные данные магнитного поля, параллельно регистрируемые на расположенной вблизи магнитной обсерватории, являются единственно возможным решением.

Все это придает исключительную актуальность задаче развертывания и поддержки стационарных непрерывных геомагнитных наблюдений в высокоширотных областях. Другое важное обстоятельство, которым обусловлена актуальность этой задачи — потребность в высококачественных геомагнитных данных для фундаментальных исследований земного магнетизма и солнечно-земной физики. С этой точки зрения решение данной задачи может быть достигнуто

путем активного научно-технического сотрудничества академических исследовательских институтов и промышленных организаций нефтегазовой отрасли, результатом которого должно стать появление более плотной сети современных геомагнитных обсерваторий в Арктической зоне РФ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Представленные в статье результаты получены на основе данных, зарегистрированных на магнитных обсерваториях. Мы благодарим национальные институты, обеспечивающие их работоспособность, и ИНТЕРМАГНЕТ (<http://intermagnet.org>) за продвижение высоких стандартов в области геомагнитных наблюдений, а также Межрегиональный центр геомагнитных данных ГЦ РАН (<http://geomag.gcras.ru>) за свободное распространение данных. Авторы также выражают благодарность международному проекту SuperMAG за свободное распространение данных мировой сети магнитовариационных станций (<https://supermag.jhuapl.edu/>). Авторы признательны В.Е. Чинкину и Д.В. Кудину за помощь в подготовке исходных данных, а также двум рецензентам, высказавшим ценные замечания к статье. В работе использовались данные и сервисы ЦКП “Аналитический центр геомагнитных данных” Геофизического центра РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Близнюков В.Ю., Повалихин А.С., Кейн С.А.* Расчет и корректирование траектории скважины при бурении. Метод. указания. Ухта: УГТУ. 2014. 35 с.
- Богоявленский В.И.* Фундаментальные проблемы поиска, разведки и рационального освоения ресурсов горючих ископаемых Арктических и субарктических регионов России (пленарный). Всероссийская конференция с международным участием “Глобальные проблемы Арктики и Антарктики”, посвященная 90-летию со дня рождения академика Николая Павловича Лаверова (2–5 ноября 2020 г., г. Архангельск). Сборник материалов. 2020. С. 20–25.
- Булатов А.И., Проселков Ю.М., Шаманов С.А.* Техника и технология бурения нефтяных и газовых скважин. Учеб. для вузов. М.: Недра-Бизнесцентр. 2003. 1007 с.
- 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.
- Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю.* Исследование геомагнитного поля и проблемы точности бурения наклонно-направленных скважин в Арктическом регионе //

- Горный журнал. 2015. № 10. С. 94–99.
<https://doi.org/10.17580/gzh.2015.10.17>
- Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Сидоров Р.В., Красноперов Р.И., Груднев А.А., Кудин Д.В., Караетян Д.К., Си-
 монян А.О.* Успехи организации геомагнитного мони-
 торинга в России и ближнем зарубежье // Вестник от-
 деления наук о Земле РАН. 2018. Т. 10. № NZ4001.
<https://doi.org/10.2205/2018NZ000357>
- Зайцев А.Н., Лобанов А.М.* Магнитометрический поли-
 гол на Ямале как основа региональной системы кон-
 троля состояния магнитного поля Земли. Геофизика и
 МГРИ. 100 лет вместе. Материалы конф. 15–18 ноября
 2018.
- Кондров Н.С., Шевелев А.А.* Обзор методов расчета про-
 филя ствола наклонно-направленной скважины // Проблемы современной науки и образования. 2017. № 22(104). С. 24–29.
- Кульчицкий В.В., Григашкин Г.А., Ларионов А.С., Шебе-
 тов А.В.* Геонавигация скважин. Учебное пособие М.:
 МАКС Пресс. 2008. 312 с.
- Оценко А.А., Сидоров Р.В., Соловьев А.А., Соловьева Е.Н.*
 Обзор применения меры аномальности для оценки
 геомагнитной активности // Геофизические исследо-
 вания. 2020. Т. 21. № 4. С. 51–69.
<https://doi.org/10.21455/gr2020.4-4>
- Построение проектного и фактического профилей
 скважины: методические указания. Сост. *Доров-
 ских И.В., Живаева В.В., Воробьев С.В.* Самара: Самар.
 гос. техн. ун-т. 2010. 50 с.
- Салихов З.С., Арабский А.К., Кузнецов В.Д., Зайцев А.Н.,
 Петров В.Г., Фомичев В.В., Трошичев О.А., Янжура А.С.*
 Система контроля космической погоды для оценки
 технологических рисков на территории полуострова
 Ямал // Наука и техника в газовой промышленности.
 2010. № 4. С. 39–47.
- Соловьев А.А., Сидоров Р.В., Красноперов Р.И., Груднев А.А.,
 Хохлов А.В.* Новая геомагнитная обсерватория “Кли-
 мовская” // Геомагнетизм и аэронавигация. 2016. Т. 56.
 № 3. С. 365–379.
- Соловьев А.А., Смирнов А.Г.* Оценка точности совре-
 менных моделей главного магнитного поля Земли с
 использованием ДМА-методов распознавания пони-
 женной геомагнитной активности по данным геомаг-
 нитных обсерваторий // Физика Земли. 2018. № 6.
 С. 72–86.
<https://doi.org/10.1134/S0002333718060108>
- Buchanan A., Finn C.A., Love J.J., Worthington E.W., Law-
 son F., Maus S., Okewunmi S., Poedjono B.* Geomagnetic
 Referencing – The Real-Time Compass for Directional
 Drillers // Oilfield Review. 2013. V. 25. № 1. P. 32–47.
- Gvishiani A., Soloviev A., Krasnoperov R., Lukianova R.* Au-
 tomated Hardware and Software System for Monitoring the
 Earth’s Magnetic Environment // Data Science J. 2016.
 V. 15. P. 18.
<https://doi.org/10.5334/dsj-2016-018>
- Jankowski J., Sucksdorff C.* Guide for Magnetic Measure-
 ments and Observatory Practice. Warsaw: International As-
 sociation of Geomagnetism and Aeronomy. 1996. 232 p.
- Khomutov S.Y.* International project INTERMAGNET and
 magnetic observatories of Russia: cooperation and progress.
 IX International Conference “Solar-Terrestrial Relations
 and Physics of Earthquake Precursors”. E3S Web of Con-
 ferences. 2018. V. 62. P. 02008.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186202008>
- Meyers H., Davis W.* A profile of the geomagnetic user and
 abuser // J. Geomagnetism and Geoelectricity. 1990. V. 42.
 P. 1079–1085.
- Newell P.T., Liou K., Zhang Y. et al.* OVATION Prime-2013:
 Extension of auroral precipitation model to higher distur-
 bance levels // Space Weather. 2014. V. 12. № 6. P. 368–
 379.
<https://doi.org/10.1002/2014sw001056>
- Ógórek I., Grzegorzewski M., Maciejowski M.* The use of
 magnetic field and magnetometers in supporting the air
 navigation // Annual of Navigation. 2015. V. 22. P. 21–29.
<https://doi.org/10.1515/aon-2015-0018>
- Onovughe E., Ootobong T.* Geomagnetic Referencing Tech-
 niques as Vital Directional Reference in Hydrocarbon
 Drilling // J. Multidisciplinary Engineering Science Stud-
 ies. 2016. V. 2. № 8. P. 836–841.
- Pasku V., De Angelis A., De Angelis G., Arumugam D.D., Di-
 onigi M., Carbone P., Moschitta A., Ricketts D.S.* Magnetic
 Field Based Positioning Systems. IEEE Communications
 Surveys & Tutorials. 2017.
<https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2684087>
- Poedjono B., Beck N., Buchanan A.C., Borri L., Maus S.,
 Finn C., Worthington E.W., White T.* Improved geomagnetic
 referencing in the Arctic environment. SPE Arctic and Ex-
 treme Environments Technical Conference and Exhibition.
 October 15–17. 2013. Moscow, Russia. Paper Number:
 SPE-166850-MS.
<https://doi.org/10.2118/166850-MS>
- Shockley J.A., Raquet J.F.* Navigation of ground vehicles us-
 ing magnetic field variations // NAVIGATION: J. Institute
 of Navigation. 2014. V. 61. № 4.
<https://doi.org/10.1002/navi.70>
- Short J.A.* Introduction to directional and horizontal drill-
 ing. Tulsa: PennWell Publishing. Tulsa, OK, USA. 1993.
 239 p.
- Soloviev A., Agayan S., Bogoutdinov S.* Estimation of geo-
 magnetic activity using measure of anomalousness // An-
 nals of Geophysics. 2016. V. 59. № 6. G0653.
<https://doi.org/10.4401/ag-7116>
- St-Louis B.* INTERMAGNET technical reference manual.
 Version 4.6. 2012. 92 p.
- Thébault E., Finlay C.C., Beggan C.D., Alken P., Aubert Ju-
 lien., Barrois O., Bertrand F., Bondar T., Boness A., Brocco L.,
 Canet E., Chambodut A., Chulliat A., Coïsson P., Civet F., Du A.,
 Fournier A., Fratter I., Gillet N., Hamilton B., Hamoudi M.,
 Hulot G., Jager T., Korte M., Kuang W., Lalanne X., Langlais B.,
 Léger J.-M., Lesur V., Lowes F. et al.* International Geomag-
 netic Reference Field: the 12th generation // Earth, Planets
 and Space. 2015. V. 67. P. 79.
- Vorobev A.V., Pilipenko V.A., Krasnoperov R.I., Vorobeva G.R.,
 Lorentzen D.A.* Short-term forecast of the auroral oval po-
 sition on the basis of the “virtual globe” technology // Russ.
 J. Earth. Sci. 2020. V. 20. P. ES6001.
<https://doi.org/10.2205/2020ES000721>

On the Need for Accurate Monitoring of the Geomagnetic Field during Directional Drilling in the Russian Arctic

A. A. Soloviev^{a, b, *}, R. V. Sidorov^{a, **}, A. A. Oshchenko^a, and A. N. Zaitsev^{a, c}

^a*Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^c*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**e-mail: a.soloviev@gcras.ru*

***e-mail: r.sidorov@gcras.ru*

The readings of well magnetometers used in directional drilling may be distorted by geomagnetic storms and substorms. These distortions occur most often in auroral latitudes. The goal of this research is to study how sporadic fluctuations of the magnetic field during geomagnetic storms impact the key parameters of the drilling path during the Earth's magnetic field navigation. This research covers the mechanisms of deviations of well profile parameters during geomagnetic disturbances of various intensity in the range from middle to high latitudes, including for virtual deposits inside and outside the auroral oval. In geographical latitudes the impact on geometrical parameters of the borehole becomes critical and results in unacceptable deviations. Consequently, rapid magnetic field variations are measured in real time by high accuracy magnetometric equipment as part of the high technology process of hydrocarbon production in the Arctic. Thus, it makes as relevant as never before to deploy and maintain stationary geomagnetic observatories in high-latitude areas and to develop intellectual methods of processing of geomagnetic measurements.

Keywords: drilling geomagnetic support, directional drilling, magnetic observatories, INTERMAGNET, Arctic zone of the Russian Federation, magnetic field variations, drilling path modelling