

## О необходимости высокоточного мониторинга геомагнитного поля при наклонно-направленном бурении в азрф

А.А. Соловьев<sup>1</sup>, Р.В. Сидоров<sup>2</sup>, А.А. Ощенко<sup>3</sup>, А.Н. Зайцев<sup>4</sup>, В.Е. Чинкин<sup>5</sup>, Д.В. Кудин<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Геофизический центр РАН, a.soloviev@gcras.ru

<sup>2</sup>Геофизический центр РАН, r.sidorov@gcras.ru

<sup>3</sup>Геофизический центр РАН, a.oshchenko@gcras.ru

<sup>4</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова РАН, alex.zaitsev1940@mail.ru

<sup>5</sup>Геофизический центр РАН, v.chinkin@gcras.ru

<sup>6</sup>Геофизический центр РАН, d.kudin@gcras.ru

---

### АННОТАЦИЯ

Для корректировки траектории при проведении наклонно-направленного бурения используются скважинные инклинометры, показания которых сильно зависят от текущих резких изменений геомагнитного поля, – прежде всего, магнитных бурь. Особенно сильно эти эффекты заметны при бурении в авроральных широтах. Данный доклад ставит своей целью продемонстрировать влияние спорадических колебаний магнитного поля во время магнитных бурь на основные показатели траектории бурения скважины при проведении наклонно-направленного бурения. Приведены закономерности изменения геометрических параметров скважины на разных широтах во время геомагнитных событий различной интенсивности. Измерения проводились на диапазоне от средних до высоких широт, в том числе на несуществующих моделируемых месторождениях внутри и за пределами аврорального овала. На высоких широтах отклонения фактических геометрических параметров скважины от проектируемых выходят за пределы допустимого. Таким образом, задача отслеживания быстрых изменений магнитного поля стоит особенно остро при проведении наклонно-направленного бурения на углеводородных месторождениях в Арктике. Исследование подтверждает актуальность развития и поддержания сетей геомагнитных обсерваторий в авроральных широтах, а также применения новых методов обработки геомагнитных данных.

**Ключевые слова:** вариации магнитного поля, наклонно-направленное бурение, моделирование траектории бурения скважины

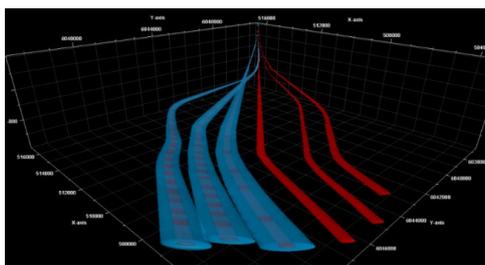
---

### ВВЕДЕНИЕ

Магнитное поле Земли широко используется в задачах навигации, т.к. его направление постоянно в каждой точке и квазипостоянно во времени. Технология навигации по магнитному полю Земли применяется при проведении наклонно-направленного бурения для освоения месторождений углеводородов (Гвишиани, Лукьянова, 2015). Такое бурение предполагает создание целой сети преимущественно горизонтальных скважин, в длину достигающих более десяти километров (Short, 1993).

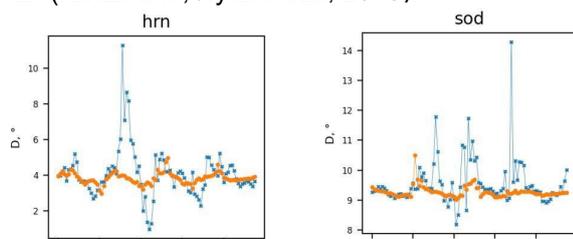
На Аляске, где эта технология была впервые применена компанией Шлюмберже, расстояние между плотно сгруппированными протяженными скважинами выдерживается в

пределах сотни метров (Poedjono et al., 2013). При этом задачи субгоризонтального бурения нередко предполагают низкую погрешность, чего невозможно добиться при использовании традиционной инклинометрии (рисунок 1). Например, в процессе нефтегазодобычи на шельфе Охотского моря, при прокладке рекордных по протяженности субгоризонтальных скважин, попадание в заданную точку под землей обеспечивается с погрешностью  $\pm 3$  метра на расстоянии 15 000 метров от устья. Требуемая точность позиционирования буровой колонны и невозможность использования ГНСС приемников (в связи с глубиной измерений) ведет к необходимости навигации по геомагнитной привязке.



**Рисунок 1.** Уменьшение пространственной неопределенности при горизонтальном бурении до 70%.

На рисунке 2 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  $10^\circ$ , тогда как допустимые отклонения азимута ствола скважины при наклонно-направленном бурении не должны превышать  $1-2^\circ$  (Гвишиани, Лукьянова, 2018).



**Рисунок 2.** Вариации магнитного склонения, зарегистрированные на обсерваториях Хорнзунд (HRN) и Соданкюля (SOD). Синие точки соответствуют данным за период геомагнитной бури, оранжевые — спокойному периоду.

Для учета столь сильных и продолжительных по времени вариаций требуется постоянный высокоточный мониторинг магнитного поля для обеспечения эталонных текущих значений и постоянной коррекции показаний магнитометра, установленного на буровой колонне.

#### 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. Исследуемые параметры включают:

- истинный географический азимут  $\phi$
- величину отклонения оси скважины от вертикали (зенитный угол  $\alpha$ )

Эти два параметра однозначно определяются по измеренным скважинным магнитнометром угловых компонент магнитного поля. Также скважинными приборами регистрируются:

- вертикальная глубина скважины
- общая длина скважины от устья до точки измерения  $L$ .

Для моделирования скважинных параметров использовался метод минимальной кривизны, подробно описанный в (Гвишиани, Лукьянова, 2018). 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. В результате расчетов по известным  $\phi$  и  $\alpha$  получаются приращения координат на отрезке  $\Delta L$  в соседних точках замера  $i, i+1$  вдоль длины ствола  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ . По приращениям координат далее рассчитываются текущие координаты  $y, x, z$  и геометрические параметры скважины: горизонтальное смещение  $A$  и азимут смещения  $\psi$  для  $i$ -й точки скважины от ее устья. Также находятся угол пространственного искривления ствола скважины  $\Delta \gamma$  на интервале  $(i, i+1)$  и интенсивность искривления ствола скважины  $J$  на интервале между точками измерений. Расчеты на модели проводились со следующими условиями:

- бурение производится в точке установки обсерватории
- Показания на скважинном инклинометре равны вариациям магнитного склонения на обсерватории
- Проектный (фактический) азимут  $\phi_n$  ( $\phi$ ) равен невозмущенной (фактической) величине магнитного склонения  $D_n$  ( $D$ )
- все измерения проводятся на участке скважины начиная с ее длины  $L_0=1020$  м
- Интервал между точками замеров — 20 м (~1 час бурения)
- Зенитный угол  $\alpha$  изменяется равномерно с шагом  $0.5^\circ$  от начального значения  $15^\circ$  на глубине 1000 м

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Гистограммы нормы  $L1$ , построенные для бури №1 (рисунок 3а), 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  $dy$ ,  $y$ ,  $S$ ,  $\Psi$ , начиная с широты станции KHS.

Аналогичное резкое возрастание наблюдается на гистограммах нормы  $L2$ , демонстрирующих результаты для бури № 2. Это можно объяснить существенной разницей в уровне геомагнитной возмущенности в зоне полярных сияний (определяемой в этой зоне главным образом эффектом ионосферных токов) по сравнению более низкими широтами. На гистограммах для нормы  $L1$  невозможно выделить какие-либо четкие закономерности отдельно для значений в высокоширотном и низкоширотном интервалах.

Для нормы  $L2$  наблюдается слабый широтный тренд для значений, находящихся в низких широтах, а для высокоширотного интервала также наблюдается отсутствие какой-либо закономерности.

Для СКО рассматриваемых параметров (рисунок 3г) также в ряде случаев характерны пиковые значения в высокоширотном интервале. Пиковые значения гистограмм, вероятно, также соответствуют границе аврорального овала. Тем не менее, для  $dy$  и  $\phi$  пиковые значения в высокоширотном интервале не выражены.

Практически во всех случаях, когда на широтных зависимостях виден хорошо выраженный пик, он находится на широтах, 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 и для разных параметров в период одной бури.

### Выводы

Таким образом, наклонно-направленное бурение скважин требует надёжного контроля ориентации буровой колонны под землей, и особенно при бурении в Арктическом регионе.

Поэтому учет вариаций магнитного поля 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.

Это придает актуальность задаче развёртывания и поддержки стационарных непрерывных геомагнитных наблюдений в высокоширотных областях.

### Благодарности

Представленные в докладе 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/>). В работе использовались данные и сервисы ЦКП «Аналитический центр геомагнитных данных» Геофизического центра РАН.

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

### ЛИТЕРАТУРА

- Гвишиани АД, Лукьянова РЮ, 2015 Исследование геомагнитного поля и проблемы точности бурения наклонно-направленных скважин в Арктическом регионе. Горный журнал, № 10, с 94-99.
- Гвишиани АД, Лукьянова РЮ, 2018 Оценка влияния геомагнитных возмущений на траекторию наклонно-направленного бурения глубоких скважин в Арктическом регионе. Физика Земли, № 4, с 19-30.
- Poedjono B, Beck N, Buchanan AC, Borri L, Maus S, Finn C, Worthington EW, White T, 2013 Improved geomagnetic referencing in the Arctic environment. SPE Arctic and Extreme Environments Technical Conference and Exhibition. October 15–17. 2013. Moscow, Russia. Paper Number: SPE-166850-MS. <https://doi.org/10.2118/166850-MS>.

St-Louis B, 2012 INTERMAGNET technical reference manual. Version 4.6. Murchison House West Mains Road, Edinburgh, UK

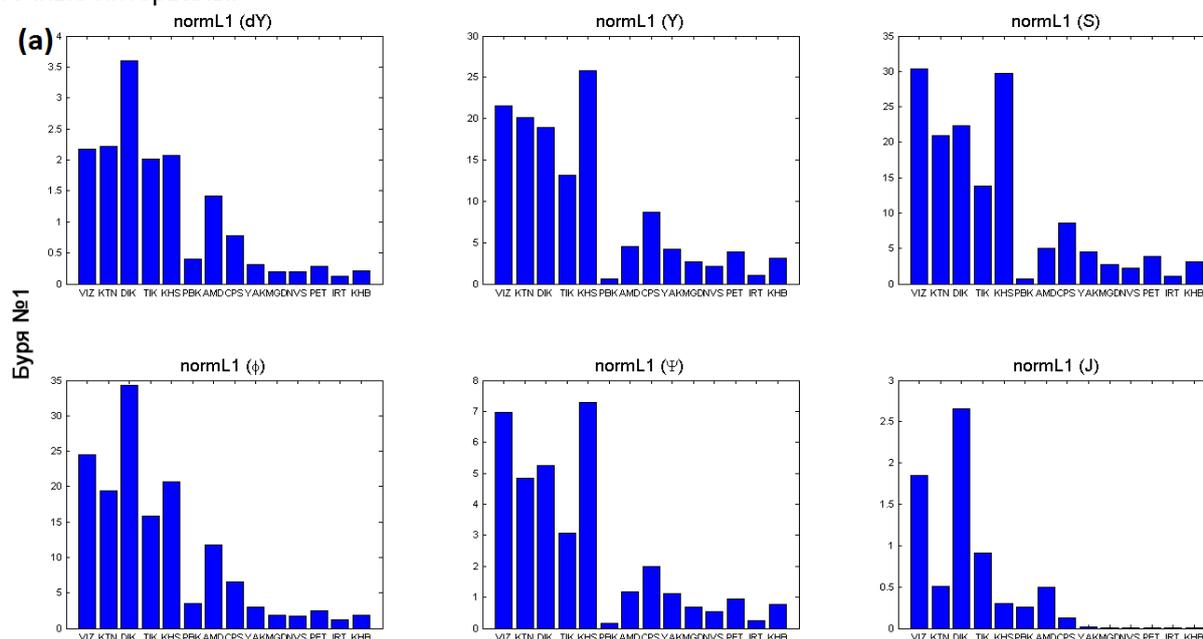
Short JA, 1993 Introduction to directional and horizontal drilling. Tulsa: PennWell Publishing. Tulsa, OK, USA

№	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	PBK	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

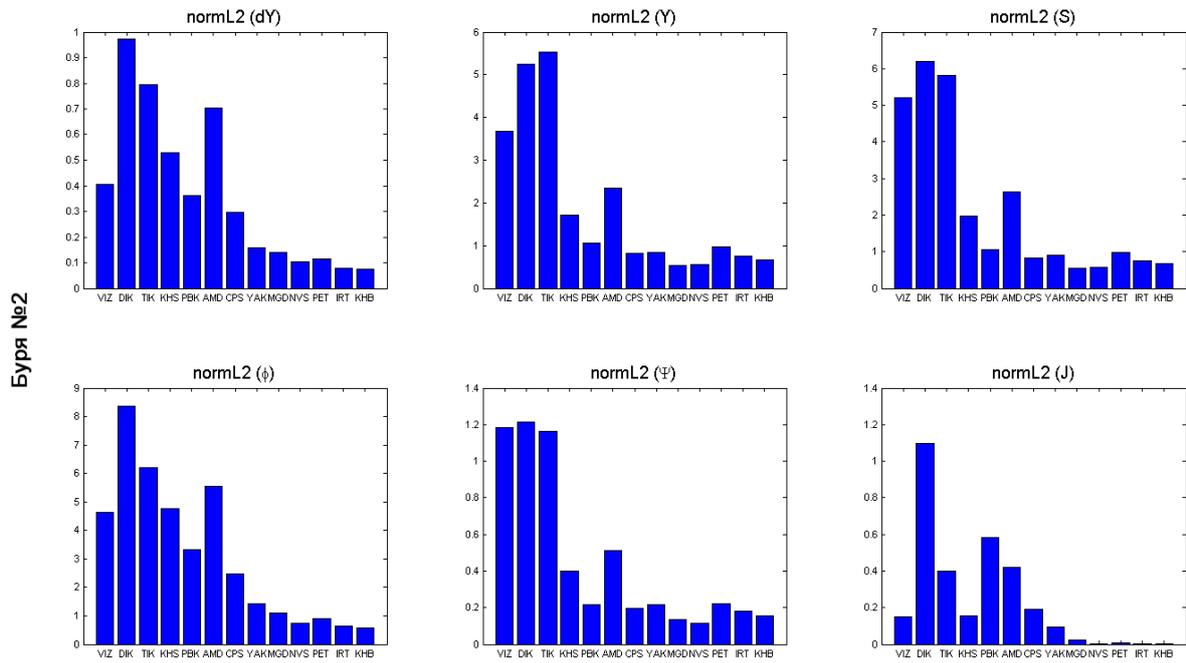
Таблица 1. Геомагнитные обсерватории и станции, данные которых использовались в исследовании.

№	Период бури	$D_{st,max}$ , нТл	$A_E,max$ , нТл	Рассматриваемый интервал
1	6–8.03.2016	-98	1428	AMD, CPS, PBK: 6.03.2016 Остальные: 7.03.2016
2	12–14.10.2016	-104	1992	13.10.2016
3	6–11.09.2017	-124	2677	AMD: 7.09.2017 Остальные: 8.09.2017
4	25–28.08.2018	-174	2200	TIK: 27.08.2018 Остальные: 26.08.2018

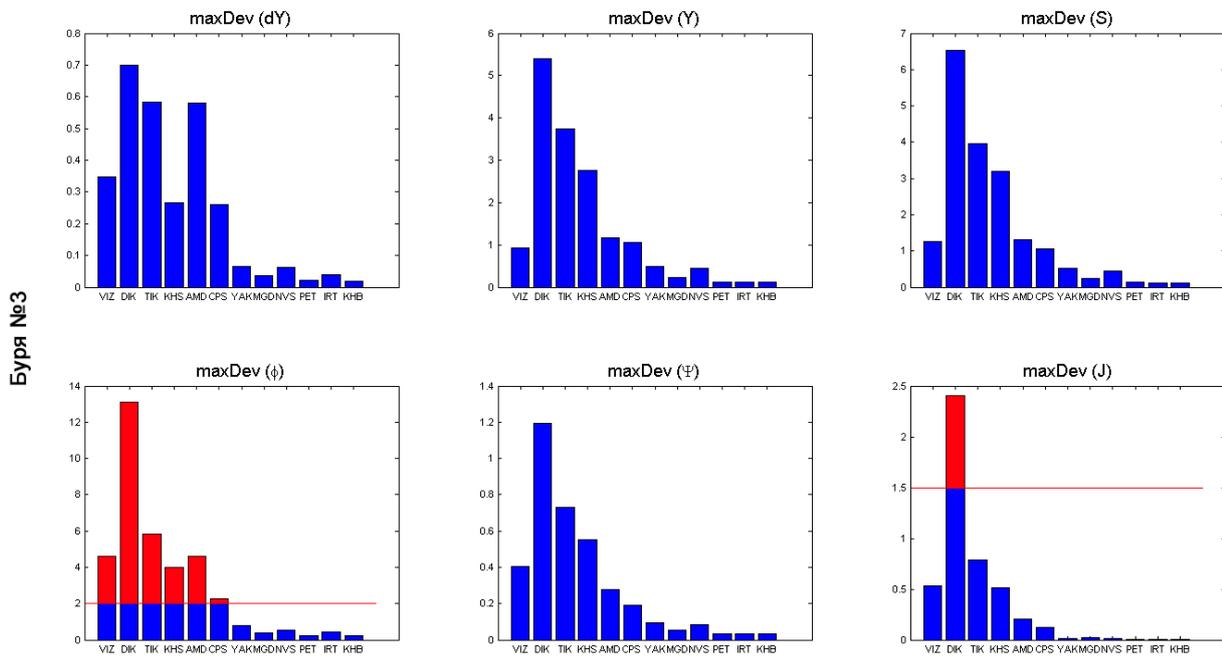
Таблица 2. Информация о рассматриваемых геомагнитных бурях и выбранные для исследования суточные интервалы.



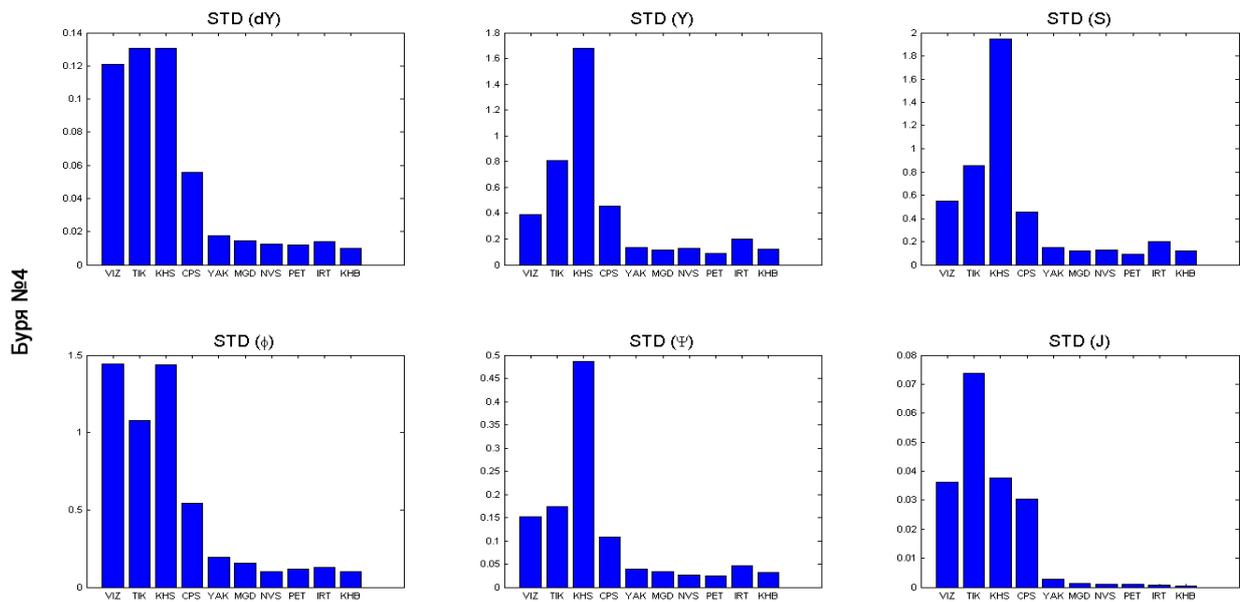
(б)



(в)



(г)



**Рисунок 3.** Обобщенные статистические показатели, полученные для каждого параметра скважины ( $dY$ ,  $S$ ,  $\phi$ ,  $\Psi$ ,  $J$ ), пункта наблюдений и бури: норма L1 для бури №1 (а), норма L2 для бури №2 (б), максимальные отклонения для бури №3 (в) и среднее квадратическое отклонение 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.