



АППАРАТУРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫСОКОТОЧНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО МОНИТОРИНГА

С.А. Казанцев, А.Д. Дучков

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,
e-mail: KasantsevSA@ipgg.sbras.ru, DuchkovAD@ipgg.sbras.ru*

В статье дано описание современного варианта аппаратуры для автономного мониторинга температуры в скважинах и водоемах. Для характеристики возможностей аппаратуры представлены результаты ее применения при длительных измерениях температуры торфяников Васюганского болота (Томская область) и дна (воды и осадков) озер Байкал и Телецкое.

Мониторинг температуры в скважинах и водоемах, автономные измерители температуры, озеро Байкал, Телецкое озеро, Васюганское болото

THE EQUIPMENT FOR PRECISE TEMPERATURE MONITORING

S.A. Kazantsev, A.D. Duchkov

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Koptug Avenue, 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: KasantsevSA@ipgg.sbras.ru, DuchkovAD@ipgg.sbras.ru*

The article describes the modern version of the equipment for the autonomous temperature monitoring in boreholes and reservoirs. To characterize the capabilities of the equipment, the results of the long-term measurements of the temperature of Vasyugan swamp (Tomsk region) peatlands and the bottom (water and sediment) of lakes Baikal and Teletskoye are presented.

Temperature monitoring in boreholes and reservoirs, autonomous temperature meters, lakes Baikal and Teletskoye, Vasyugan swamp

ВВЕДЕНИЕ

Накопленные к настоящему времени геотермические данные выявили существенную нестационарность температурного поля Земли. Наибольший практический интерес представляет короткопериодная часть (от часов до нескольких лет) нестационарной компоненты, которая определяется как естественными физическими процессами (климатическими, метеорологическими, фазовыми переходами, гидрогеологическими, приливными, тектоническими и сейсмическими), так и

искусственными, связанными с конструкцией скважины и методикой температурных измерений (свободная конвекция, внутрискважинные и заколонные перетоки флюидов, влияние системы измерений).

Вариации температурного поля, связанные с этими причинами, могут быть непосредственно зарегистрированы с помощью систем непрерывного геотермического мониторинга в скважинах разной глубины и в донных осадках водоемов. Результаты мониторинга позволяют оценить глубинный тепловой поток в условиях сильных климатических помех, влияние поверхностных условий на распространение в горные породы климатического сигнала; выяснить прогностические возможности геотемпературного поля в сейсмоактивных районах. В настоящее время высокоточный мониторинг температуры входит в обязательный комплекс исследований изменений природной среды и климата. Он проводится обычно в скважинах геодинамических, мерзлотных и гидрологических полигонов.

Высокоточный (до сотых–тысячных долей градуса) мониторинг температуры (Т) начал развиваться сравнительно недавно. Он стал возможен после появления во второй половине XX столетия автономной аппаратуры для выполнения таких измерений. В ИНГГ СО РАН первые разработки высокоточных автономных многоканальных измерителей температуры были выполнены авторами еще в 1980-х годах [Авторское свидетельство, 1985]. Тогда же один из первых вариантов станции под названием «ГЕТАС» был выпущен малой серией (около 20 штук) Опытным заводом СО АН СССР. Аппаратура за год–два разошлась по геологическим институтам страны, проводящим геотермические исследования. В последующие годы развитие аппаратуры непрерывно продолжалось [Дучков, Казанцев, 1993; Казанцев и др., 2013].

В данной статье описаны конструктивные особенности современного варианта аппаратуры и обсуждаются наиболее интересные результаты ее использования, дающие представление о возможностях автономных измерителей температуры.

ХАРАКТЕРИСТИКА СТАНЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО МОНИТОРИНГА (СТМ)

Технической особенностью последней версии автономной станции температурного мониторинга является то, что она может работать как с аналоговыми датчиками температуры, термисторами, так и с цифровыми датчиками типа DS18B20 (совместно или отдельно, в зависимости от решаемых задач). Термисторные датчики собираются в многопроводные гирлянды (термокосы) различной длины, а цифровые в трехпроводную гирлянду. Термокоса размещается в скважине, регистрирующая часть СТМ – на устье скважины или прикапывается рядом со скважиной. При измерениях в водоемах СТМ размещается в герметичном контейнере, что позволяет ее погружать в изучаемую среду вместе с термокосой.

Функциональная схема СТМ представлена на рис. 1. Станция работает следующим образом: часы реального времени через заданные интервалы активизируют микропроцессор (в нашем случае STM32L151R) на проведение измерений. Микропроцессор предназначен для управления режимами работы станции в целом, установки параметров аналого-цифрового преобразователя, таймера и первичной обработки данных, записи их в энергонезависимую память.

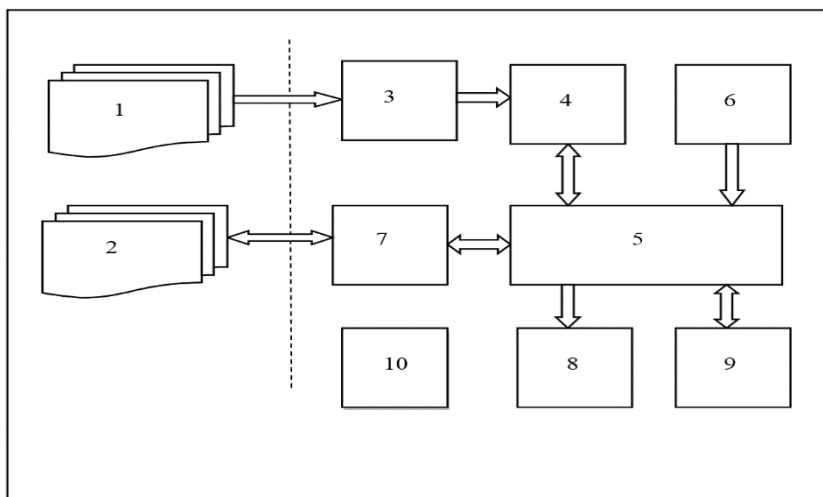


Рис. 1. Функциональная схема станции температурного мониторинга. 1 – термисторные датчики температуры, 2 – цифровые датчики температуры, 3 – коммутатор, 4 – аналого-цифровой преобразователь, 5 – микропроцессор, 6 – часы реального времени, 7 – контроллер 1-Wire шины, 8 – оперативная память, 9 – модем радиосвязи, 10 – элемент питания

В процессе измерений термисторные датчики температуры поочередно подключаются к аналого-цифровому преобразователю (АЦП) с помощью 8-канального коммутатора. АЦП обеспечивает выходной цифровой код в зависимости от установки режима 16 или 24 разряда. Контроллер 1-Wire шины обеспечивает подключение цифровых температурных датчиков. Далее результаты измерений записываются в энергонезависимую память объемом до 100 000 измерений. Затем станция переходит в режим хранения информации. Микропроцессор имеет режим микропотребления при хранении информации и активизируется только для измерения, записи или передачи записанных данных, благодаря чему обеспечивается минимальное энергопотребление, фактически всего 2–5 мкА. Литий-ионные аккумуляторы станции (нормальное напряжение 4 В) обеспечивают непрерывную запись температуры сроком до года. Время старта и интервал между измерениями задается программно с клавиатуры компьютера и может составлять от десятков секунд до десятков часов. Высокоточные часы реального времени определяют временные интервалы работы микропроцессора и обеспечивают временную привязку результатов измерений. Точность измерения абсолютных значений температуры всех устройств определяется возможностями калибровки датчиков и составляет $0,01 \pm 0,02^\circ \text{C}$. Относительные изменения температуры регистрируются с разрешением до $0,002^\circ \text{C}$.

Результаты измерений термисторных датчиков хранятся в памяти СТМ в Омах и пересчитываются по индивидуальным калибровкам в температуры уже в компьютере. Данные с цифровых датчиков сохраняются сразу в градусах Цельсия. Специализированная программа считывает записанную информацию на компьютер через USB-порт, при необходимости память устройства очищается. После отключения компьютера регистратор автоматически переходит в рабочий режим. Данные проходят предварительную обработку и сохраняются в табличном виде. В зоне покрытия сотовой связи возможна передача данных в реальном масштабе времени по каналам GPRS.

В дальнейшем будет показано, что СТМ изготавливалась в разных вариантах (в основном изменялись виды корпусов, термокос и количество датчиков), наиболее удобных для проведения того или иного эксперимента. На рис. 2 показаны два вида СТМ.



Рис. 2. Вид СТМ во влагозащитном и герметичном корпусах

Описанная станция является основным звеном целого комплекса аппаратуры, который может быть использован для изучения температурного режима различных природных объектов, измерения теплофизических свойств пород. В состав комплекса, помимо устройств для мониторинга температуры, входят стенд для автоматизированной калибровки датчиков [Казанцев, Кальяк, 2018], лабораторные измерители теплофизических свойств пород [Казанцев, Фадеева, 2015].

Автономные СТМ использовались авторами и другими исследователями при длительном изучении температурных вариаций в шпурах и скважинах Быстровского и Ключевского полигонов (Новосибирская область) [Юшин и др., 2011], обсерватории Талая (южный берег оз. Байкал) [Пермяков и др., 2014], Семипалатинского полигона [Аюнов и др., 2017], в донных осадках оз. Байкал [Дучков и др., 2007] и Телецкого озера [Дучков, Казанцев, 2007], в торфах Васюганского болота [Дюкарев и др., 2009] и других часто трудно доступных геологических объектах. В данной статье мы ограничимся рассмотрением только нескольких результатов температурного мониторинга.

ТЕМПЕРАТУРА ДНА ОЗЕРА БАЙКАЛ

Наиболее интересные результаты получены нами в процессе годичного мониторинга температуры дна (вода и осадки) глубоководной части озера Байкал [Дучков и др., 2007]. Такой эксперимент был выполнен впервые и до сих пор не превзойден. Электронная часть погружного зонда была построена на основе СТМ и помещена в тяжелый герметичный контейнер, который обычно применяется при измерении тепловых потоков в донных осадках глубоких водоемов.

Постановка зонда на дно оз. Байкал была осуществлена 28.03.2003 г. вблизи подводного метанового источника «Старый» (51°54' с.ш., 105°36,4' в.д.; глубина дна ~1350 м). Зонд поднят на поверхность через год – 11.03.2004 г. В течение мониторинга датчики опрашивались через 1,5 часа (16 измерений в сутки). Результаты мониторинга (графики изменения температуры) приведены на рис. 3. Два нижних, практически совпадающих, графика иллюстрируют вариации температуры придонной воды (датчики Т6 и Т8). Датчики Т5–Т2 зафиксировали годовые изменения температуры в осадках. Анализ экспериментальных кривых показывает, что температура дна вблизи источника «Старый» постоянно изменяется, хотя амплитуды вариаций невелики – от 0,07° С до 0,01° С и менее. Длительность вариаций температуры придонной воды колеблется от нескольких месяцев до суток. По записям отчетливо различаются два периода изменения температуры дна (как воды, так и осадков): относительно «спокойный» летне-осенний период (середина июня 2003 г. – начало февраля 2004 г.) и зимне-весенний «нестационарный». Практически все вариации температуры придонной воды проникали в поверхностный слой осадков (график Т5). Датчики, расположенные глубже (графики Т4–Т2), отметили только самые значительные изменения температуры придонной воды, которые наблюдались в «нестационарные» периоды. В «спокойный» период на этих глубинах сохранялась постоянная температура, нарушаемая лишь приборными шумами. Очевидно, что «спокойный» период является наиболее благоприятным для изучения теплового потока в Южно-Байкальской впадине. При работе в зимний период возможны значительные ошибки в оценке геотермического градиента в верхнем метровом слое осадков.

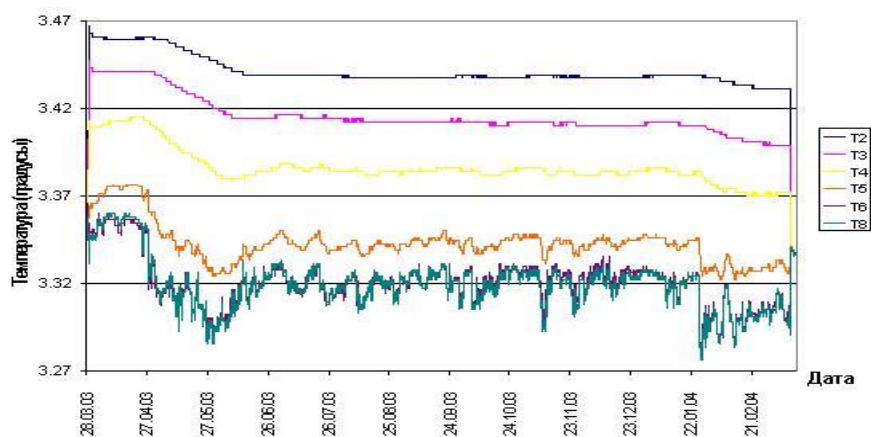


Рис. 3. Температура придонной воды и илов дна озера Байкал. Индексы кривых (Т2–Т8) соответствуют номерам термодатчиков. Датчики Т6 и Т8 располагались в воде (выше дна примерно на 20 и 110 см), датчики Т5–Т2 – в донных илах (ниже дна примерно на 10, 46, 82 и 118 см)

ТЕМПЕРАТУРА ДНА ТЕЛЕЦКОГО ОЗЕРА

Аналогичный эксперимент с применением той же аппаратуры был выполнен в донных осадках наиболее глубокой центральной части Телецкого озера (профиль р. Корбу – р. Чадор, глубина дна 320 м, длительность мониторинга – 2,8 месяца) [Дучков, Казанцев, 2007]. Результаты мониторинга приведены на рис. 4 в виде графиков температуры придонной воды (T_v) и верхнего слоя осадков. В процессе мониторинга зафиксированы значительные вариации температуры дна (воды и осадков) на максимальной для этого озера глубине. Очевидно, что изменения температуры в осадках вызваны проникновением в них температурной волны, формирующейся в придонном водном слое. Вплоть до 04.12.2005–05.12.2005 г. происходило увеличение T_v (на $0,6^\circ\text{C}$), а в осадках сохранялся отрицательный геотермический градиент (Γ). В последующем зафиксирована резкая смена температурного режима в системе «вода-осадки»: произошло уменьшение T дна более, чем на 1°C и начали устанавливаться положительные значения Γ . За весь период наблюдений геотермический градиент изменялся в изучаемом слое (0–140 см) от -360 до $+170$ мК/м. Полученные экспериментальные данные впервые зафиксировали значительную нестационарность температурного поля верхнего слоя (более 1,4 м) донных осадков даже в наиболее глубокой части Телецкого озера. Это обстоятельство не позволяет измерить стандартными методами (погружными зондами) глубинную составляющую геотермического градиента (теплового потока). Можно предположить, что только длительный мониторинг температуры (более 1–2 года) в осадках на разных глубинах в слое 1,5–2 м может дать достаточно материала для оценки стационарных значений температуры осадков на глубине расположения датчиков.



Рис. 4. Температура придонной воды и илов дна центральной части Телецкого озера в октябре–декабре 2005 г. Номера восьми датчиков указаны справа от графиков. Датчики 6–8 расположены в придонном слое воды, датчик 5 – на дне, датчики 4–1 – ниже дна на 35, 70, 105 и 140 см соответственно

МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ

Температурный режим почв формируется под влиянием климатических условий и факторов, характеризующих тепловое взаимодействие горных пород с атмосферой. Для изучения этих факторов нами совместно с сотрудниками ИМКЭС СО РАН (г. Томск) экспериментально изучены закономерности изменений температурного поля торфяной залежи в одном из районов Васюганского болота, расположенного в южной части Западной Сибири [Дюкарев и др., 2009].

Для проведения этих работ было изготовлено специальное устройство (зонд), состоящее из небольшого герметичного контейнера (диаметр 40 мм, длина 200 мм) с присоединенной стальной трубкой длиной 1 м. В контейнере размещалась модификация СМТ, а в трубке – восемь терморезисторов. После внедрения зонда в почву датчики температуры располагались на глубинах 2, 5, 10, 15, 25, 40, 60 и 80 см от поверхности. Измерения температуры торфяной залежи проводились в течение 812 дней с 28 июня 2005 г. по 26 сентября 2007 г. В зимнее время года измерения T выполнялись в автономном режиме через 1 час, а в летнее время – через 15 минут. В результате получен огромный экспериментальный материал. Для иллюстрации результатов измерений на рис. 5 приведены две летние записи (30.07.2007 и 02.07.2006) суточного хода температуры воздуха и торфяной почвы на разных глубинах. В 2007 г. записан «нормальный» ход суточной температуры, запись 2006 г. иллюстрирует влияние на температуру инфильтрации осадков (дождя). Осадки приводят во второй половине суток к резкому снижению T_a и, наоборот, к возрастанию T почв. Экспериментальные данные можно использовать для количественного анализа процессов теплопередачи в торфяной почве, формирования и разрушения сезонно-мерзлого слоя, инфильтрации осадков, взаимодействия солнечного и внутриземного тепловых потоков.

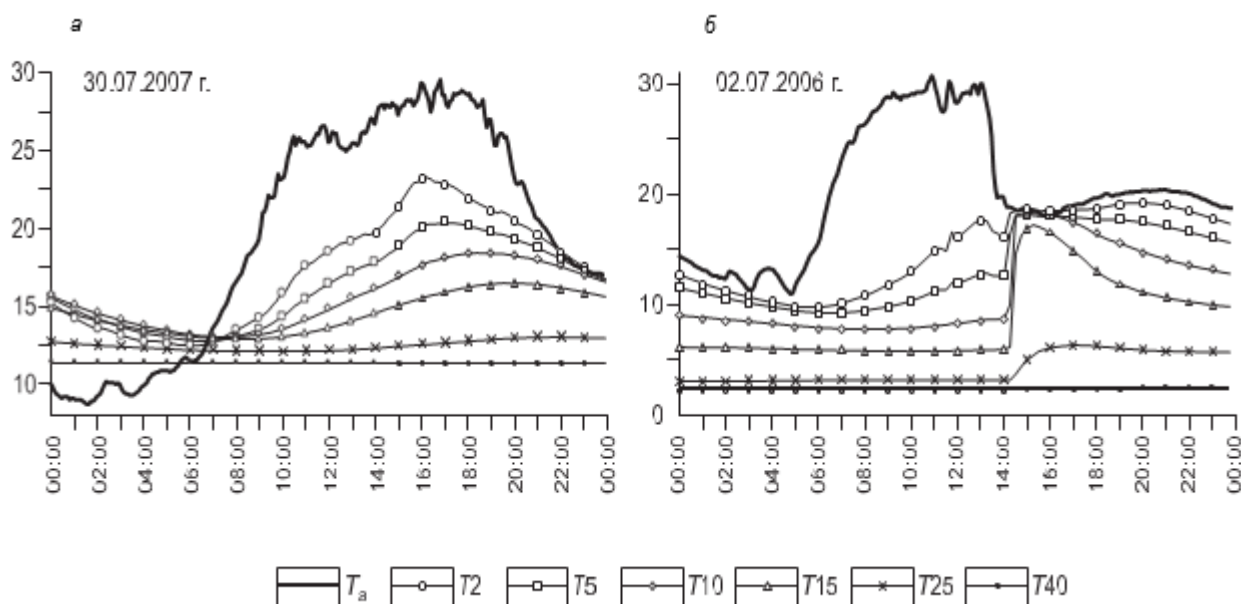


Рис. 5. Суточный ход температуры почвы (T_2 - T_{40}) на глубинах 2, 5, 10, 15, 25, 40 см и температуры воздуха (T_a): а – 30.07.2007 – «нормальный» суточный ход T торфяного слоя; б – 02.07.2006 – суточный ход T , нарушенный прогреванием почвы дождевой водой (T_a при этом существенно охлаждается)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многие природные явления (климатические, геологические) и техногенные факторы, связанные с освоением земной поверхности и ее недр, сохраняют свой «энергетический след» в тепловом поле Земли, в его нестационарной компоненте. Выявление этого «следа», т. е. вариаций температурного поля в горных породах, осуществляется с помощью геотермического мониторинга. В ИНГГ СО РАН многие годы осуществляются разработка и изготовление автономных регистраторов температуры, ориентированных главным образом на измерение сигналов от гирлянд (термокос) датчиков, размещенных в скважинах разной глубины или водоемах. Показано, что несомненными достоинствами комплекса аппаратуры являются его надежность, точность измерения температуры, большие объемы памяти, низкое общее энергопотребление, возможность длительной автономной работы, простота и удобство в работе и обслуживании. Рассмотренные в статье примеры применения разработанных станций мониторинга температуры убедительно показывают, что описанная техника позволяет осуществлять автономный мониторинг температуры труднодоступных природных геологических объектов. Получаемые при этом материалы могут быть использованы при решении различных практических задач, связанных, например, с изучением динамики распространения климатических температурных волн в горные породы, водных потоков, криогенных процессов и т. д.

Исследование выполнено по плану базовых научно-исследовательских работ отделения геофизики ИНГГ СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

- Авторское свидетельство** 1148992. Устройство для измерения температуры в скважине / С.А. Казанцев, А.Д. Дучков, С.И. Чазов (СССР). – № 3665801; заявл. 10.10.1983; опубл. 07.04.1985, Бюл. № 13. – 3 с.: ил.
- Аюнов Д.Е., Дучков А.Д., Казанцев С.А., Романенко В.В., Субботин С.Б.** Современный температурный режим Атомного озера (Семипалатинский испытательный полигон) // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58, № 7. – С. 1082–1086.
- Дучков А.Д., Казанцев С.А.** Автономная аппаратура для режимных измерений температуры // Геотермия сейсмичных и асейсмичных зон. – М.: Наука, 1993. – С. 365–373.
- Дучков А.Д., Казанцев С.А.** Аномальные изменения температурного режима дна (воды и осадков) Телецкого озера в осенне-зимний период // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48, № 12. – С. 1366–1370.
- Дучков А.Д., Казанцев С.А., Дучков А.А.** Мониторинг температуры дна озера Байкал // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48, № 4. – С. 472–480.
- Дюкарев Е.А., Головацкая Е.А., Дучков А.Д., Казанцев С.А.** Экспериментальное исследование температурного режима торфяной залежи Бакчарского болота (Западная Сибирь) // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50, № 6. – С. 745–754.
- Казанцев С.А., Кальяк А.А.** Совершенствование методики градуировки полупроводниковых термодатчиков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь: XIV Международный научный конгресс (г. Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.): Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии

поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология»: Сб. материалов в 6 т. Т. 3. – Новосибирск: СГГА, 2018. – С. 223–226.

Казанцев С.А., Пермяков М.Е., Дучков А.Д. Устройство для оперативного температурного мониторинга // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.): Междунар. научн. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: Сб. материалов в 3 т. Т. 2. – Новосибирск: СГГА, 2013. – С. 203–207.

Казанцев С.А., Фадеева И.И. Устройство для оперативного измерения температуропроводности слабосцементированных пород // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.): Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: Сб. материалов в 3 т. Т. 2. – Новосибирск: СГГА, 2015. – С. 82–85.

Пермяков М.Е., Дучков А.Д., Демежко Д.Ю., Казанцев С.А. Мониторинг температуры в скважине обсерватории «Талая» (южное побережье оз. Байкал) // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.): Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология». Сб. материалов в 4 т. Т. 3. – Новосибирск: СГГА, 2014. – С. 3–7.

Юшин В.И., Аюнов Д.Е., Дучков А.Д. Мониторинг изменений температуры под плитой действующего сейсмического вибратора // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.): Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технология поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых»: Сб. материалов в 6 т. Т. 2, Ч. 1. – Новосибирск: СГГА, 2011. – С. 32–36.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ДУЧКОВ Альберт Дмитриевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории естественных геофизических полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: геотермия, газовые гидраты.

КАЗАНЦЕВ Сергей Алексеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории естественных геофизических полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: аппаратура и методика температурного мониторинга.