

Производственный опыт

УДК 550.832

*К. А. Машкин, В. М. Романов, П. А. Сафонов
АО НПП «ВНИИГИС», ООО НПП «ИНГЕО»*

АППАРАТУРА И КОМПЛЕКСЫ, РАЗРАБОТАННЫЕ ВНИИГИС И ООО НПП «ИНГЕО» ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СКВАЖИН

Рассматриваются разработки для каротажа неглубоких скважин, скважинные приборы для исследования нефтегазовых, рудных, угольных и гидрогеологических скважин. Приведен перечень разработанной стандартной и комплексной аппаратуры для решения широкого круга геолого-геофизических задач на месторождениях нефти, газа, золота, алмазов, урана, угля, пресных вод.

Ключевые слова: каротаж, аппаратурно-методические комплексы, нефтегазовые скважины, месторождения твердых полезных ископаемых, гидрогеология, скважинные приборы.

Приведя к самому серьезному спаду мировой экономики со времен Великой депрессии, пандемия COVID-19 обрушила энергетические рынки мира и привела к торможению глобального спроса на нефть, газ и уголь, что не могло не отразиться на их крупнейших поставщиках, к числу которых относится и Россия.

Под влиянием пандемии и сделки ОПЕК+ по итогам первых 11 месяцев 2020 г. нефтедобыча России в годовом выражении сократилась на 8,3% (до 470,2 млн т), поставки на внутренний рынок – на 5,2% (до 246,5 млн т), а экспорт – сразу на 12% (до 214,8 млн т). Если на нефтяном рынке в предкризисном 2019 г. лишь наметился тренд на

снижение цен, то на европейском рынке газа он был гораздо более выраженным. С 2010 по 2019 год потребление газа в Европе снизилось более чем на 11% (с 623 до 554 млрд м³). В этой связи если и стоит ожидать роста трубопроводных поставок российского газа, то в основном в Китай по газопроводу «Сила Сибири», базой для которого служит Чаяндинское месторождение Якутии, где газодобыча составила 2,8 млрд м³ за первые 9 месяцев 2020 г. и пока отстает от проектной мощности – 25 млрд м³ в год [2].

В то же время горнодобывающая отрасль занимает прочные позиции в контексте последствий COVID-19. По мнению аналитиков, 40 крупнейших горнодобывающих компаний мира (в том числе российские – ГМК «Норильский никель», ПАО «Полус», АК «АЛРОСА», занявшие в 2020 г. в топ-40 соответственно 5-е, 16-е и 24-е места) достаточно успешно преодолевают трудности, обрушившиеся на них в связи с пандемией COVID-19. Большинство компаний из топ-40 воспользовались преимуществами непрерывного ведения добычи, которое было разрешено правительствами основных горнодобывающих стран. В итоге отрасль продемонстрировала устойчивость к шоковому событию мирового масштаба [3].

Согласно стратегии развития минерально-сырьевой базы РФ до 2035 г., в период 2020–2024 годов прогнозируется рост добычи всех твердых полезных ископаемых, в том числе меди с 923,3 до 996,5 тыс т, железной руды с 351 до 378,8 млн т, золота с 299 до 322,6 т, алмазов с 40,2 до 43,3 млн карат, урана с 3777,4 до 4076,7 т, редкоземельных металлов с 104,8 до 113,1 тыс т. В этот же период планируется завершить целый ряд знаковых проектов горнорудной отрасли: строительство Баимского ГОКа (ООО «ГДК «Баимская», Билибинский район Чукотского АО, ресурсы – 9,5 млн т меди и 16,5 млн унций золота); строительство ГОКа на Удоканском месторождении меди (АО «Корпорация развития Дальнего Востока» и Байкальская горная компания, Каларский район Забайкальского края, производство в течение 40 лет 36 млн т меди и попутного серебра); строительство Южного ГОКа (АО «Атомракетзолото», архипелаг Новая Земля Архангельской области, запасы Павловского месторождения – 2,5 млн т цинка, 549 тыс т свинца, 1194 т серебра); строительство Ново-Учалинского подземного рудника (Учалинский район Республики Башкортостан, планируемый уровень добычи –

4,5 млн т медной руды); строительство ГОКа на Ак-Сугском медно-порфириновом месторождении (компания «Интергео», Тоджинский кожуун Республики Тыва, плановая производительность рудника – 14 млн т руды в год); строительство ГОКа на базе Тырныаузского вольфрамомолибденового месторождения (ГК «Ростех», г. Тырныауз Кабардино-Балкарской Республики); старт добычи меди на Перевальном месторождении (АО «Полиметалл», Магаданская область, запасы – более 1 млн т высококонцентрированной руды); строительство ГОКа «Озерный» на базе месторождения полиметаллических руд (Озерная горнорудная компания, Республика Бурятия). И это далеко не все инвестиционные проекты, окончание которых планируется в ближайшие годы [1]. Очевидно, что успех реализации стратегии развития минерально-сырьевой базы нашей страны не в последнюю очередь будет обусловлен надлежащим уровнем сервисных услуг, оказываемых горнодобывающим компаниям собственными или подрядными, в том числе геофизическими, предприятиями.

Возможно, именно поэтому в течение 2020 г., в то время как обвал нефтяных котировок в условиях пандемии COVID-19 привел к снижению финансирования нефтесервисных услуг (российский нефтесервисный рынок снизился на 20–25% [5]), наблюдается активизация деятельности производственных геофизических предприятий, обслуживающих сектор разведки и добычи углеводородных полезных ископаемых.

ВНИИГИС традиционно поддерживает тесные связи и поставляет каротажное оборудование и скважинные приборы собственной разработки как нефтесервисным компаниям [6], так и геофизическим предприятиям горнорудного комплекса России, стран СНГ и дальнего зарубежья [4, 7].

Для проведения геофизических исследований нефтегазовых скважин отдел аппаратуры и методики радиоактивного каротажа ВНИИГИС выпускает приборы импульсных и стационарных методов нейтронного каротажа, приборы комплекса ядерно-геофизических методов каротажа, представленные в табл. 1. Приборы изготавливаются для работы в условиях максимальной температуры до 120–150 °С, давления до 60–100 МПа, внешним диаметром 42–100 мм, исходя из предполагаемых геолого-технических условий и с учетом требований технического задания заказчика.

Таблица 1

**Скважинные приборы радиоактивных методов каротажа
для исследования нефтегазовых скважин**

Метод ГИС	Аппаратура	Измеряемые параметры
Спектрометрический импульсный нейтронный гамма-каротаж (ИНГК-С, спектры ГИНР, ГИРЗ), С/О-каротаж	ЦСП-С/О-90	Спектральные отношения (С/О, Ca/Si) Элементный состав скелета (О, Si, Ca, Mg, S, H, C, Cl и др.) Элементный состав флюида (О, H, C, Cl)
Спектрометрический гамма-каротаж (СГК)	ЦСП-ГК-С-73/90	МЭД Массовые содержания U, Th, K
Импульсный нейтронный гамма-каротаж Импульсный нейтрон-нейтронный каротаж Гамма-каротаж	ЦСП-2ИНГК-43М ЦСП-2ИННК-43, в т. ч. с локатором муфт и каналом ГК	Сечение поглощения (SIGMA) или время жизни (TAU) тепловых нейтронов Водородосодержание МЭД Локатор муфт
Спектрометрический импульсный нейтронный гамма-каротаж (2ИНГК-С, спектры ГИНР, ГИРЗ по двум зондам) Импульсный нейтронный гамма-каротаж (2ИНГК) Спектрометрический гамма-каротаж (СГК)	ЦСП-2ИМКС-73	Спектральные отношения (С/О, Ca/Si) Элементный состав скелета (О, Si, Ca, Mg, S, H, C, Cl и др.) Элементный состав флюида (О, H, C, Cl) Сечение поглощения тепловых нейтронов Σ_a Водородосодержание МЭД Массовые содержания U, Th, K
Нейтронный гамма-каротаж Нейтрон-нейтронный каротаж Гамма-каротаж	ЦСП-2НГК-43 ЦСП-2ННК-43, в т. ч. с локатором муфт и каналом ГК	Водородосодержание МЭД Локатор муфт

Примечание: МЭД – мощность экспозиционной дозы.

Работы рудного направления геофизики начаты во ВНИИГИС еще в 70-х годах прошлого века. Основная задача – разработка и выпуск легких, мобильных цифровых каротажных станций и компьютеризированных аппаратурно-методических комплексов (КАМК), укомплектованных под ключ всем необходимым геофизическим оборудованием: каротажным регистратором, технологическим программным обеспечением, спуско-подъемным оборудованием, а также

оптимальным набором скважинных приборов малого диаметра для выполнения исследований в неглубоких (до 1000 м) скважинах.

Заметный этап интенсивного развития данного направления был связан с созданием в 1999 г. на базе отдела аппаратуры и методики радиоактивного каротажа ВНИИГИС малого научно-производственного предприятия «ИНГЕО» (ООО НПП «ИНГЕО»). Именно специалистами ООО НПП «ИНГЕО» разработан уникальный, не имеющий мировых аналогов, взрывозащищенный вариант КАМК «Алмаз-1».

Основным заказчиком данного оборудования является геолого-разведочная экспедиция АК «АЛРОСА», поэтому КАМК имеет ряд особенностей, характерных для проведения поисковых и разведочных работ на месторождениях алмазов. КАМК предназначен для проведения ГИС в подземных горных выработках, опасных по газу и нефти, с целью решения задач по изучению физических свойств кимберлитов и вмещающих горных пород, определению геометрии рудного тела и техническому сопровождению при бурении горизонтальных, наклонно-нисходящих и наклонно-восстающих скважин. Его основу составляют взрывозащищенные компьютер, цифровой каротажный регистратор «Вулкан V3» и система контроля глубины «Ясон» (АО НПФ «Эликом», г. Уфа), спуско-подъемное оборудование со взрывозащищенным электродвигателем и каротажными штангами, а также скважинные приборы поискового комплекса [8] для исследования скважин глубиной до 500 м (рис. 1, 2). В настоящее время интерес к этой разработке проявляют геофизики ГМК «Норильский никель», ООО «Башкирская медь», перед которыми также стоят задачи проведения каротажа скважин, бурящихся из шахт.

Для геофизических исследований рудных и гидрогеологических скважин предлагаются любые типы скважинных приборов – радиоактивных, электрических и электромагнитных методов каротажа – для целенаправленного изучения элементного состава горных пород и руд цветных, благородных и редкоземельных металлов, поиска и разведки месторождений золота, угля, урана, алмазов и подземных вод, а также для определения технического состояния скважин (табл. 2–4). Приборы этой группы изготавливаются для применения в условиях температуры в диапазоне от -20 до $+80^{\circ}\text{C}$, давления от 10 до 20 МПа, с минимально возможным внешним диаметром, а также в кислотостойком исполнении.

Под технические требования заказчика ведутся разработки и выпуск комплексных скважинных приборов, позволяющих за одну спуско-подъемную операцию одновременно регистрировать до четырех методов каротажа (табл. 5).



Рис. 1. Взрывозащищенный вариант КАМК «Алмаз-1» (общий вид)



Рис. 2. Технологическое оборудование КАМК «Алмаз-1»

Таблица 2

**Скважинные приборы радиоактивных методов каротажа
для исследования рудных скважин**

Метод ГИС	Аппаратура	Измеряемые параметры
Рентгенорадиометрический каротаж (РРК)	РРК-43	Содержание элементов, %
Плотностной гамма-гамма-каротаж (ГГК-П)	2ГГК-П-48 (2π) ГГКМ-43 (4π)	Плотность (ρ), $г/см^3$
Селективный гамма-гамма-каротаж (ГГК-С)	ГГК-С-43	Эффективный атомный номер ($Z_{эф}$), а. е.
Каротаж нейтронов деления (КНД)	ЦСП-КНД-60	Содержание урана (C_U), %
Спектрометрический гамма-каротаж (СГК)	ЦСП-ГК-С-48/73/90	U, Th, K, %
Гамма-каротаж (ГК)	ГКМ-36/43/48	МЭД, $мкР/ч$
Нейтронный каротаж (НГК/ННК)	ЦСП-2НГК-43 ЦСП-2ННК-43	k_n , %

Таблица 3

**Скважинные приборы электрических и электромагнитных
методов каротажа для исследования рудных скважин**

Метод ГИС	Аппаратура	Измеряемые параметры
КС ПС	КСП-43 КСП-ГК-43	$\rho_{к'}$, $Ом \cdot м$ ΔU , $мВ$
Каротаж вызванной поляризации (ВП)	ВПРМ-43 ВПР-ГК-43	$\rho_{к'}$, $Ом \cdot м$ ΔU , $мВ$ Поляризуемость, %
Каротаж магнитной восприимчивости (КМВ)	КМВ-Ц-43	α , ед. $СИ \cdot 10^{-5}$
Индукционный каротаж (ИК)	ИК-42К ИК-42КТ	Удельная электрическая проводимость (σ), $мСм/м$
Магнитометрия	МСПГ	Полный вектор геомагнитной индукции, $нТл$
Резистивиметрия	ГТР-43, ТР-43	УЭС, $Ом \cdot м$

Таблица 4

Скважинные приборы для определения
технического состояния скважин

Метод ГИС	Аппаратура	Измеряемые параметры
Кавернометрия	КМ-43-1	Диаметр скважины, мм
Инклинометрия	СИМ-42	Зенитный угол, град Азимут, град
Термометрия	ЭТС-10У	Температура, °С
ГК, локатор муфт	ЛМ-ГК-43	МЭД, мкР/ч
Отбор стволовой жидкости	ПСП-76	Проба 1 л жидкости

Таблица 5

Комплексные скважинные приборы для исследования
неглубоких скважин

Метод ГИС	Аппаратура	Измеряемые параметры
ГК КС ПС	КСП-ГК-43	МЭД, мкР/ч $\rho_{\text{к}}$, Ом·м ΔU , мВ
ГК КС ПС Инклинометрия	КСП-ГК-43И	МЭД, мкР/ч $\rho_{\text{к}}$, Ом·м ΔU , мВ Зенитный угол, град Азимут, град
ГК КС ПС Инклинометрия Кавернометрия	КСП-ГК-60ИК	МЭД, мкР/ч $\rho_{\text{к}}$, Ом·м ΔU , мВ Зенитный угол, град Азимут, град Диаметр скважины, мм
Индукционный каротаж (ИК) Токовый каротаж	ИК-42ИК	Удельная электрическая проводимость (σ), мСм/м
ГК Резистивиметрия Термометрия	ГТР-43	МЭД, мкР/ч УЭС, Ом·м Температура, °С

Таблица 5 (продолжение)

КС ПС Каротаж вызванной поляризации (ВП) ГК	ВПр-ГК-43	$\rho_k, \text{ Ом}\cdot\text{м}$ $\Delta U, \text{ мВ}$ Поляризуемость, % МЭД, мкР/ч
Плотностной гамма-гамма- каротаж (ГГК-П) Термометрия ГК	ГГКМ-43Т (4л)	Плотность (ρ), г/см ³ Температура, °С МЭД, мкР/ч
Спектрометрический гамма-каротаж (СГК) Магнитометрия	ЦСП-ГК-С-МСПГ	U, Th, K, % Полный вектор геомагнитной индукции, нТл

Каротажное оборудование и скважинные приборы, созданные в АО НПП «ВНИИГИС» и ООО НПП «ИНГЕО», направлены на повышение эффективности разведки и разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. В настоящее время аппаратурно-методические комплексы широко применяются геофизическими предприятиями в производственном режиме и позволяют решать актуальные задачи, стоящие перед геологоразведочной отраслью РФ.

Дальнейшее развитие методик и аппаратуры ГИС пойдет по пути создания комплексных скважинных приборов, объединяющих в одну связку наибольшее количество методов каротажа, применения в конструкции аппаратуры новейших композиционных материалов и современных радиоэлектронных компонентов (в перспективе – отечественного производства), внедрения и использования сложных алгоритмов цифровой обработки сигнала и создания новых методик комплексной геолого-геофизической интерпретации зарегистрированных данных. Вместе с тем первичными были и остаются технические требования и пожелания заказчиков, которые закладывают основу для разработки, создания и изготовления новой геофизической техники и технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горнорудная промышленность: основные тенденции. Компания «Восток Капитал» // Конференция «Горнорудная промышленность России и СНГ». Курск: 24–25 марта 2021 г.

2. Интернет-ресурсы: <https://www.pwc.ru/ru/publications/collection/covid-19-and-russian-exports.pdf>
3. Интернет-ресурсы: <https://www.pwc.ru/ru/publications/mine-2020/mine-2020.pdf>
4. *Машкин А. И., Перельгин В. Т., Машкин К. А., Огнев А. Н. и др.* Современные аппаратурно-методические комплексы и геофизические технологии для исследования рудных и гидрогеологических скважин // НТС «Аппаратурно-методические комплексы для геофизических исследований нефтегазовых и рудных скважин». М.: ВНИИГеосистем, 2012. С. 18–27.
5. Обзор нефтесервисного рынка России–2020. Исследовательский центр компании «Делойт» в СНГ. Ноябрь 2020 г.
6. *Перельгин В. Т., Машкин К. А., Коротченко А. Г., Гайнетдинов Р. Г. и др.* Опыт развития и применения комплекса методов импульсного спектрометрического нейтронного каротажа в различных геолого-технических условиях // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2016. Вып. 6 (264). С. 39–54.
7. *Перельгин В. Т., Машкин К. А., Коротченко А. Г., Гайнетдинов Р. Г. и др.* Актуальные разработки ОАО НПП «ВНИИГИС» и ООО НПП «ИНГЕО»: аппаратура и комплексы для геофизических исследований скважин на месторождениях твердых полезных ископаемых и подземных вод // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2016. Вып. 7 (265). С. 24–51.
8. *Перельгин В. Т., Машкин К. А., Рыскаль О. Е., Романов В. М. и др.* Современные геофизические технологии и комплексы для поисков и разведки месторождений алмазов на предприятиях компании «АЛРОСА» // Материалы IV Региональной научно-практической конференции «Геологическое обеспечение минерально-сырьевой базы алмазов: проблемы, пути решения, инновационные разработки и технологии». Мирный, 2014. С. 158–161.

Рецензент канд. геол.-минер. наук М. Я. Боровский