

АКТУАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ГЕОФИЗИКИ В ЦЕЛЯХ ДОСТИЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА РОССИИ

© 2024 г. С.А. Тихоцкий^{a,b,*}

^aИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

^bМосковский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

*E-mail: sat@ifz.ru

Поступила в редакцию 07.08.2024 г.

После доработки 08.08.2024 г.

Принята к публикации 19.08.2024 г.

В статье анализируются наиболее актуальные задачи геофизики по обеспечению технологического суверенитета Российской Федерации в современных условиях. Дан краткий обзор роли прикладной геофизики в развитии экономики, укреплении суверенитета и безопасности страны с начала XX в. по настоящее время. Важнейшая задача этой науки состоит в обеспечении всех отраслей промышленности, в первую очередь высокотехнологичных, необходимыми минеральными ресурсами. Обоснованы наиболее важные направления геофизических исследований, включая поиск и разведку экономически эффективных месторождений стратегического минерального сырья, повышение эффективности добычи углеводородов и твёрдых полезных ископаемых на основе геофизического мониторинга, обеспечение геофизической безопасности. Отмечается, что соответствующие цели недостижимы без технологического суверенитета самой геофизической отрасли, что означает необходимость создания отечественных геофизических приборов, оборудования, программного обеспечения и технологий. Предложены направления развития геофизических технологий. Констатируется, что для технологического прорыва в геофизической отрасли необходимо объединить усилия учёных разного профиля: геофизиков, геологов, физиков и математиков. Статья подготовлена на основе доклада, заслушанного на заседании президиума РАН 11 июня 2024 г.

Ключевые слова: геофизика, технологический суверенитет, минерально-сырьевая база, стратегические полезные ископаемые, геофизический мониторинг, эффективность добычи углеводородов, сейсмическая безопасность.

DOI: 10.31857/S0869587324100016, EDN: ESPBPW

Геофизика, понимаемая как наука о физических процессах в недрах Земли и изучении строения недр посредством физических полей и явлений, сравнительно молода. Так, первый электромеханический сейсмограф — прибор для регистрации колебаний земной поверхности — был создан академиком



ТИХОЦКИЙ Сергей Андреевич — член-корреспондент РАН, директор ИФЗ РАН.

Б.Б. Голицыным в 1906 г., немногим более столетия назад. Между тем уже начиная с первой половины XX в. геофизика играла важнейшую роль не только в познании фундаментальных закономерностей строения и эволюции нашей планеты, но и в решении прикладных задач развития экономики, включая поставку минерально-сырьевых ресурсов, а также в обеспечении обороны и безопасности страны. Причём роль геофизики, как будет показано далее, зачастую оказывалась критически важной именно в переломные моменты, когда под влиянием внешних и внутренних факторов происходила перестройка промышленности и экономики в целом.

Современный этап развития характеризуют вызовы, во многом подобные тем, с которыми столкнулась молодая советская страна в 20–30-е годы XX в. Необходимо в кратчайшие сроки перестроить экономику на выпуск высокотехнологичной

продукции. При этом достижение технологического суверенитета означает не только развитие собственных компетенций по всему промышленному спектру, но и обеспечение производства всеми необходимыми минерально-сырьевыми ресурсами. Высокотехнологичные изделия содержат значительные количества металлов (включая редкоземельные) и полуметаллов. Например, для создания одного смартфона нужно переработать 30–40 кг различных руд [1]. Важнейший современный тренд — активное развитие электрического транспорта, включая автономные беспилотные системы, что невозможно без создания компактных и энергоёмких аккумуляторов, в состав которых входят значительные объёмы таких элементов, как литий, кадмий, никель. Не меньшее значение имеют металлы платиновой группы, свинец, цинк и иные полезные ископаемые, отнесённые к стратегическому минеральному сырью распоряжением Правительства РФ от 30 августа 2022 г. № 2473-р.

В современных условиях обладание запасами соответствующих руд и технологиями их обогащения становится одним из основных факторов экономической конкуренции и влияния на международную арене. Наглядной иллюстрацией такого положения дел может служить введённый Китайской Народной Республикой в 2023 г. запрет на экспорт галлия, германия и их соединений — ключевых элементов, используемых в производстве полупроводниковых устройств. Поэтому невозможно полагаться на закупки критически важного для промышленности минерального сырья даже в дружественных странах. Экономика Российской Федерации должна быть обеспечена минерально-сырьевыми ресурсами, добываемыми на территории страны. Разведка и освоение значительных запасов стратегического минерального сырья позволит, кроме того, реализовывать его на мировом рынке.

В области поиска и разведки таких полезных ископаемых в последние 30 лет наблюдается застой, хотя в советский период на территории нашей страны было разведано значительное количество месторождений. Однако концентрации полезных элементов в рудах этих месторождений относительно низкие, что требует применения для их переработки до необходимых в промышленности концентраций и чистоты дорогостоящих и зачастую недоступных в настоящее время отечественной промышленности технологий. Решение этой проблемы должно состоять во встречном движении: с одной стороны, необходимо разрабатывать новые технологии обогащения руды, с другой — вести поиск и разведку месторождений с высокими концентрациями и качеством руд. Геолого-минералогические исследования позволяют утверждать, что такие месторождения присутствуют на территории Российской Федерации, в частности в Восточной Сибири и Арктической зоне [2, 3]. Здесь можно ожидать открытия богатых месторождений редкоземельных руд,

сходных с теми, которые обнаружены в Китае [4]. Однако их поиск и разведка осложнены труднодоступностью территорий и тем, что рудные объекты перекрыты осадочными отложениями. В этих условиях единственным способом определения районов, перспективных на обнаружение богатых руд, остаётся применение разномасштабных геофизических исследований, включая дистанционные: от космической съёмки до съёмок с БПЛА, с детализацией при помощи наземных работ в пределах выделенных участков.

Несмотря на повышенное внимание к месторождениям твёрдых полезных ископаемых и активно обсуждаемые перспективы “зелёной” энергетики, сложился консенсус относительно того, что углеводороды продолжают сохранять важнейшее значение на протяжении десятилетий. Помимо того, что они служат основой всей современной химической промышленности и играют важнейшую роль в создании новых материалов, углеводородное сырьё по-прежнему составляет основу энергетики. По различным оценкам [5, 6], разведанных в России традиционных запасов нефти при текущем уровне потребления хватит до 2035–2050 гг. Согласно Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2050 г. (утверждена распоряжением Правительства РФ № 1838-р от 11 июля 2024 г., далее — Стратегия развития МСБ), нефть и газовый конденсат отнесены к группе полезных ископаемых, достигнутые уровни добычи которых недостаточно обеспечены запасами на период до 2035 г.

В этих условиях возможны два направления развития нефтедобывающей отрасли: вовлечение в разработку так называемых нетрадиционных ресурсов (плотных коллекторов со сверхнизкой проницаемостью, высоковязких и битуминозных нефтей, отложений баженовской, доманиковой, куонамской свит и др.) и повышение эффективности разработки разведанных месторождений с целью максимального повышения коэффициента извлечения нефти. Решение и той и другой задачи невозможно без развития геофизических методов исследований. В случае с разведкой нетрадиционных ресурсов геофизики должны прежде всего указать участки, где бурение и применение методов интенсификации притока наиболее эффективно (так называемые “сладкие места” — *sweet spots*). Без этого экономическая эффективность разработки сомнительна и плохо предсказуема. А для повышения эффективности добычи на уже разрабатываемых месторождениях как традиционного, так и нетрадиционного типа необходим геофизический мониторинг процессов в пластах и покрывках. Это позволит не только повысить извлекаемость сырья за счёт оптимизации разработки, но и снизить риски природно-техногенных аварий при бурении и экологического ущерба. Сложность и стоимость современных технологий нефтедобычи, равно как и сложность геологических условий большинства новых месторождений,

таковы, что их разработка вслепую, без постоянного контроля геофизическими методами, практически невозможна. Здесь важно отметить, что все перечисленные выше задачи геофизики требуют не просто расширения полевых исследований, но создания качественно новых технологий как геофизического эксперимента, так и обработки и интерпретации данных, основанных на глубоком понимании физики пласта и микронеоднородных горных пород и современных методах математического моделирования и машинного обучения.

ГЕОФИЗИКА НА СЛУЖБЕ ГОСУДАРСТВА И ОБЩЕСТВА: НЕКОТОРЫЕ ВЕХИ ИСТОРИИ

1920-е годы: разведка Курской магнитной аномалии. Как уже отмечено, современные проблемы геофизической науки во многом сходны с теми, которые возникали на протяжении последних более чем 100 лет развития нашей страны. Традиционно становление прикладной геофизики в СССР связывают с разведкой железных руд Курской магнитной аномалии (КМА). Крупнейшие залежи железистых кварцитов на юге России создают высокоинтенсивное аномальное магнитное поле, которое сравнимо по амплитуде с главным (нормальным) магнитным полем Земли и потому обнаруживается по аномальному поведению стрелки компаса. О существовании КМА было известно с XVIII в., честь её открытия принадлежит академику Санкт-Петербургской академии наук П.Б. Иноходцеву, который обнаружил аномалию при проведении геодезических работ в Курской губернии. Попытки систематической разведки КМА предпринимались начиная с 1890-х годов, когда под руководством профессора Московского университета Э.Е. Лейста было выполнено около 4500 наблюдений аномального поля и пробурен ряд скважин, которые, впрочем, руды не обнаружили.

Интерес к железным рудам КМА резко вырос после 1917 г., когда молодое советское государство оказалось в международной изоляции и перед необходимостью скорейшей индустриализации, создания собственной промышленности, что требовало наличия доступного минерального сырья. Правительство поддержало работы Лейста, но в связи с ухудшением состояния здоровья он был вынужден отправиться на лечение в Германию, где планировал закончить обработку измерений и составление карт аномального поля. Однако вскоре после отъезда Лейст скончался, а правительство Германии предложило советскому правительству выкупить материалы съёмки КМА за 5 млн рублей золотом — огромная по тем временам сумма.

Нарком внешней торговли Л.Б. Красин обратился к физики и геофизику, академику П.П. Лазареву с вопросом о целесообразности выкупа. Пётр Петрович в ответ пообещал выполнить исследова-

ния за меньшие деньги и с лучшим качеством [7]. И своё слово сдержал: уже в 1923 г., через три года после начала работ, первая пробуренная скважина вскрыла залежь с рекордным даже для руд КМА содержанием железа — 71%. Положение скважины было выбрано на основании результатов магнитной съёмки. Геофизика решила ключевую задачу: указала на положение “сладкого места” — участка, где дальнейшие геологоразведочные работы наиболее эффективны. По сей день рудники КМА остаются важнейшим источником железорудного сырья для отечественной металлургии, благодаря чему обеспечиваются не только потребности отечественной промышленности, но и значительная доля экспорта чугуна, стали и металлопроката.

1930-е годы: становление работ по изучению сейсмической опасности. Ещё десятилетием ранее перед геофизикой встала и первая задача в области безопасности: необходимость оценки сейсмических воздействий. Интенсивное промышленное и гражданское строительство, в том числе на Кавказе, в Средней Азии, освоение Сибири и Дальнего Востока требовало системного подхода к оценке сейсмического риска и сейсмостойкому строительству. Особое внимание к этой проблеме было привлечено после крымских землетрясений 1927 г. Уже в марте 1928 г. для её решения декретом Совнаркома был создан Сейсмологический институт АН СССР (СИАН). Результаты проводившихся здесь исследований быстро внедрялись в практику. В 1933 г. директор СИАН член-корреспондент АН СССР П.М. Никифоров отмечал в интервью газете “Вечерняя Москва”: “Ни одно сколько-нибудь ответственное строительство в сейсмических районах СССР не обходится без более или менее обстоятельной консультации со стороны СИАНа”.

В 1937 г. была создана первая карта общего сейсмического районирования территории СССР — одна из первых карт подобного рода в мире. С тех пор и до настоящего времени нормативная система, регламентирующая строительство в сейсмоопасных регионах нашей страны, с одной стороны — одна из наиболее строгих и глубоко разработанных, а с другой — динамично развивающаяся как с точки зрения методов и подходов к оценке сейсмической опасности, так и в отношении получения и использования новых данных. Важно отметить, что вопросы оценки сейсмической опасности и сейсмического районирования с 1928 г. и до настоящего времени остаются в компетенции научных организаций, находящихся под научно-методическим руководством РАН, а принципиальные решения принимаются непосредственно в Российской академии наук на уровне Отделения наук о Земле и президиума РАН при активном участии научных советов РАН.

1930–1950-е годы: разведка “второго Баку” — Волго-Уральской нефтегазоносной провинции. В дореволюционной России и в первые годы советской вла-

сти потребности отечественной промышленности в нефти полностью покрывались за счёт добычи на Апшеронском полуострове и Северном Кавказе. Малая глубина залегания, высокая проницаемость коллекторов, высокое качество нефти — всё это делало добычу в Азербайджане и последующую транспортировку в центральную Россию экономически целесообразной. Однако потребности промышленности и транспорта быстро росли, кроме того, удалённость центра нефтедобычи от промышленных регионов, помимо повышения стоимости продукции, имела негативное значение и с точки зрения безопасности государства: обеспечение экономики и армии топливом зависело от уязвимых путей транспортировки нефти (по морю, Волге и по железным дорогам) из приграничного региона, находящегося в потенциально уязвимом положении. Эти опасения подтвердились во время Великой Отечественной войны, когда в 1942 г. целью наступления гитлеровцев на Кавказе и на Волге как раз и стало перерезание нефтяной артерии.

С 1920-х годов начался поиск нефти в Поволжье, где нефтепроявления были известны с XVIII в. Буровые работы, проводившиеся на этой территории с конца XIX в., не приносили значимого результата вплоть до 1932 г., когда в Башкирии, в районе деревни Ишимбаево с глубины 680 м забил первый нефтяной фонтан. Практически одновременно подтвердилось наличие нефтяных залежей в Самарской области. В 1934–1938 гг. были приняты постановления ЦК ВКПб и Совнаркома СССР о развитии геологоразведки и добыче нефти в Поволжье. Однако в отличие от Кавказа разведка здесь требовала значительно более глубокого и сложного бурения, далеко не каждая скважина вскрывала нефтяную залежь, а бурение вслепую оказывалось чрезвычайно затратным и малоэффективным. На помощь геологам, став их глазами, пришла геофизика.

С начала 1930-х годов в СИАНе и Институте теоретической геофизики (ИТГ) АН СССР разрабатывались фундаментальные основы исследований, принципиально новые, мирового уровня методы, а также приборы и оборудование для изучения недр при помощи упругих волн — сейсмической разведки. В СИАНе талантливые математики В.И. Смирнов и С.Л. Соболев (позднее академики АН СССР) разработали метод функционально-инвариантных решений, который позволил решать задачи излучения и дифракции упругих волн в недрах [8]. Одновременно в ИТГ АН СССР Г.А. Гамбурцев (впоследствии академик, директор Геофизического института АН СССР) развернул работы по созданию чувствительных и компактных сейсмографов для проведения сейсморазведки, предложил два основных метода сейсмической разведки: преломлённых и отражённых волн. В 1941 г. Гамбурцеву была присуждена Сталинская премия за разработку методов и аппаратуры для сейсмической разведки.

Результаты этих работ и поныне составляют основу всей нефтегазовой геофизики.

Показательно, насколько быстро происходило в те годы внедрение фундаментальных исследований в практику. 17 июня 1941 г. президиум АН СССР принял постановление о разработке методов поиска новых нефтяных месторождений в Башкирии [9], которое предусматривало создание Башкирской экспедиции, объединяющей усилия институтов АН СССР с включением в состав отрядов работников Наркомнефти. Руководитель экспедиции — вице-президент АН СССР академик О.Ю. Шмидт, руководитель геофизических работ — профессор Г.А. Гамбурцев. Экспедиция немедленно приступила к исследованиям в Поволжье, применяя весь арсенал только что созданных геофизических методов (Гамбурцев лично руководил полевыми работами в Башкирии). Применение методов сейсмической разведки радикально изменило подход к поискам нефти, позволив перейти от бурения практически вслепую, на основании косвенных признаков, к площадному поиску нефтяных ловушек — антиклинальных структур, в сводах которых закладывались поисковые скважины. Геофизика доказала свою высокую эффективность: уже в 1944 г. с её помощью было открыто крупнейшее Ромашкинское месторождение нефти и множество других структур. С 1940 по 1943 г. число геофизических партий в СССР увеличилось вдвое — с 46 до 92.

Состоявшееся во многом именно благодаря геофизическим исследованиям открытие “второго Баку”, как стали называть Волго-Уральскую нефтегазоносную провинцию, позволило обеспечить нефтью и продуктами её переработки промышленность и армию в годы войны, а также сыграло огромную роль в послевоенном восстановлении страны.

1940–1950-е годы: атомный проект. Велик вклад геофизической науки в развитие атомной промышленности. В 1946–1951 гг. под руководством Г.А. Гамбурцева велась разведка урановых руд, составивших минерально-сырьевую базу атомного проекта. Кроме того, именно геофизические исследования сделали возможным контроль за проведением ядерных испытаний, что стало основой Договора о всеобъемлющем их запрещении. В 1954 г. по распоряжению Совета министров СССР в структуре Геофизического института АН СССР была создана специальная сейсмометрическая обсерватория и начато строительство двух высокочувствительных сейсмических станций [10]. Их создание значительно затрудняла ограниченная на тот момент чувствительность низкочастотных сейсмографов, необходимых для регистрации волн и оценки параметров испытаний в любом регионе планеты. Потребовалось тщательно выбирать места и способ размещения аппаратуры. К 1958 г. эти обсерватории зарегистрировали 31 ядерное испытание, тогда как США сообщили лишь о 14.

1945–1970-е годы: Сибирская нефть. Быстрый рост промышленности в послевоенные годы, освоение Сибири и Дальнего Востока увеличивали потребности нашей страны в нефти и газе. Реконгноспировочные работы в Западной Сибири были начаты ещё в 1930-е годы, с 1948 г. начато бурение опорных скважин. Первые нефтяные фонтаны в Западной Сибири удалось получить в 1960–1961 гг., в 1965 г. было открыто крупнейшее Самотлорское нефтяное месторождение, в 1969-м — гигантское Ямбургское газовое месторождение.

К тому времени разведочная геофизика уже доказала свою эффективность при поисках нефти и газа, продолжалось активное развитие её аппаратурной, теоретической и методической базы. Большую роль в этом сыграли учёные Новосибирского научного центра академики Н.Н. Пузырёв, С.В. Гольдин и их ученики, а также ленинградская научная школа профессора Г.И. Петрашеня, разрабатывавшая теорию распространения сейсмических волн. В 1970-е годы была внедрена система многократных перекрытий в методе отражённых волн (метод МОВ–ОГТ), которая позволила кратно увеличить разрешающую способность сейсморазведки и обеспечила существенный прирост геологической информации. Геофизическая наука и производство шли в те годы рука об руку, как и ранее, при разведке Волго-Уральской провинции, результаты научных исследований быстро внедрялись в практику. В качестве примера можно привести инициативу главного инженера Тюменского территориального геологического управления Л.Г. Цибулина по созданию регулярной сети регионального сейсмического профилирования МОВ–ОГТ [11]. Эта уникальная система позволила получить целостное представление о строении Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна и определить стратегию поисковых работ, что привело к быстрому увеличению разведанных запасов нефти и газа, которые и по сей день составляют основу нефтегазовой отрасли нашей страны. В 1980-е годы объём и качество сейсморазведочных работ в Западной Сибири возросли благодаря применению новых методов и аппаратуры. Наступила эпоха 3D-сейсморазведки, которая до настоящего времени служит ведущим методом нефтегазовой геофизики. Значение успешного освоения запасов сибирской нефти для развития экономики и обеспечения стратегических интересов России на международной арене, как и роль в этом методов разведочной геофизики, переоценить невозможно.

ЗАДАЧИ ГЕОФИЗИКИ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Поиск и разведка месторождений стратегического минерального сырья. Достижение технологического суверенитета Российской Федерации невозможно без устойчивого обеспечения промышленности

стратегическими металлами, бокситами, графитом, кварцевым и другим сырьём, необходимым для высокотехнологичных наукоёмких производств, включая атомную и оборонную промышленность, металлургию, микроэлектронику, авиационную, космическую отрасли, автомобилестроение, машиностроение, “зелёную” энергетику, производство медицинского оборудования.

Согласно Государственному докладу о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации за 2021 год и Стратегии развития МСБ, минерально-сырьевая база России с её балансовыми геологическими запасами составляет основу функционирования и стабильного развития добывающей и перерабатывающей отраслей национальной экономики. Перечнем поручений Президента Российской Федерации от 28.06.2022 г. № Пр-1130 предусмотрена разработка Федеральной научно-технической программы, направленной на обеспечение комплексного сопровождения геологоразведочных работ, добычу и промышленную переработку твёрдых полезных ископаемых, а также ускоренное замещение импортных технологий и оборудования российскими аналогами.

Минерально-сырьевой потенциал нашей страны способен обеспечить решение всех актуальных задач национальной экономики и национальной безопасности исходя из стратегических целей при любых сценариях развития мировой ситуации до 2060 г. В то же время значительная часть разведанных к настоящему времени на территории Российской Федерации месторождений стратегического минерального сырья содержит руды с низким содержанием ценных компонентов, обогащение которых до уровня, необходимого для извлечения соответствующих элементов в промышленных масштабах, требует привлечения сложных и дорогостоящих технологий. Вместе с тем геологические и геофизические данные указывают на наличие на территории Российской Федерации, прежде всего в Сибири и Крайнем Севере, месторождений стратегического сырья с запасами высококачественных руд. С точки зрения металлогенической зональности практически вся территория Дальневосточного федерального округа относится к Тихоокеанскому рудному поясу (ТРП), в пределах которого находится до 36% мировых запасов золота, 54% запасов серебра, 43% — цинка, 28% — свинца, 51% — молибдена, 86% — сурьмы, до 80% — редкоземельных металлов [12]. При этом сектор ТРП на востоке России занимает территорию, практически в 2 раза превышающую Южно-Американский сектор ТРП, и примерно равен по площади Северо-Американскому сектору ТРП.

Глобальная металлогеническая однородность ТРП позволяет предположить возможность открытия в его пределах поныне слабо изученного российского сектора крупных месторождений богатых руд, сопоставимых с зарубежными аналогами [2, 3, 12].

Это могут быть уникальные месторождения бериллия, такие как Спур Маунтин (США), из руд которого добывается до 70% этого металла в мире, марганца (высокодефицитного металла) с качеством руд, позволяющим использовать их без обогащения (аналоги месторождений Чили), иттрия и других редкоземельных элементов (аналогичные месторождения Китая) [4], а также других стратегических полезных ископаемых.

Трудности геологоразведки на этих территориях определяются сложным геологическим строением, а рудные объекты в большей части перекрыты породами различного генезиса, что делает практически невозможным их непосредственное геологическое изучение. В этих условиях ключевая роль в поисках и разведке месторождений принадлежит геофизическим методам исследований различного масштаба: от дистанционных космических съёмок и аэросъёмок до детальных работ на суше и акваториях (рис. 1).

На первом этапе необходимо составить базу данных по физическим полям, связанным с известными месторождениями определённых приоритетных типов в России и за рубежом (поле силы тяжести, магнитное поле), данных гиперспектральных съёмок, а также детальной информации о физических свойствах пород, составляющих как сами месторождения, так и вмещающие и ассоциированные структуры. Для этого могут быть использованы как фондовые материалы Росгеолфонда, так и об-

щедоступные данные спутниковых и аэросъёмок, иные модели аномальных полей. Физические поля должны быть приведены (редуцированы) к уровням высот съёмок, соответствующим тем, которые планируется использовать при поиске новых месторождений. Аномальное магнитное поле также необходимо редуцировать к магнитной широте участка съёмки, поскольку один и тот же объект по-разному выглядит в аномалиях магнитного поля вблизи полюса и вблизи экватора — в зависимости от направления вектора главного магнитного поля Земли.

Собранные и обработанные таким образом материалы составляют основу для обучения алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ), таких как нейронные сети, обнаружения “эталонных образов” месторождений в физических полях различного масштаба. Однако экспериментальных данных для обучения может быть недостаточно как в количественном (число известных месторождений и объём съёмок ограничены), так и в качественном (строение и состав месторождений сильно варьируют) отношении. Для преодоления этой проблемы необходимо строить обобщённые вероятностные модели месторождений, под которыми понимаются структурно-вещественные модели, отражающие общие закономерности строения и состава, конкретные параметры которых носят вероятностный характер — описываются распределениями вероятности. При создании таких моделей ведущую роль играет опыт геологов, специалистов по соответстви-

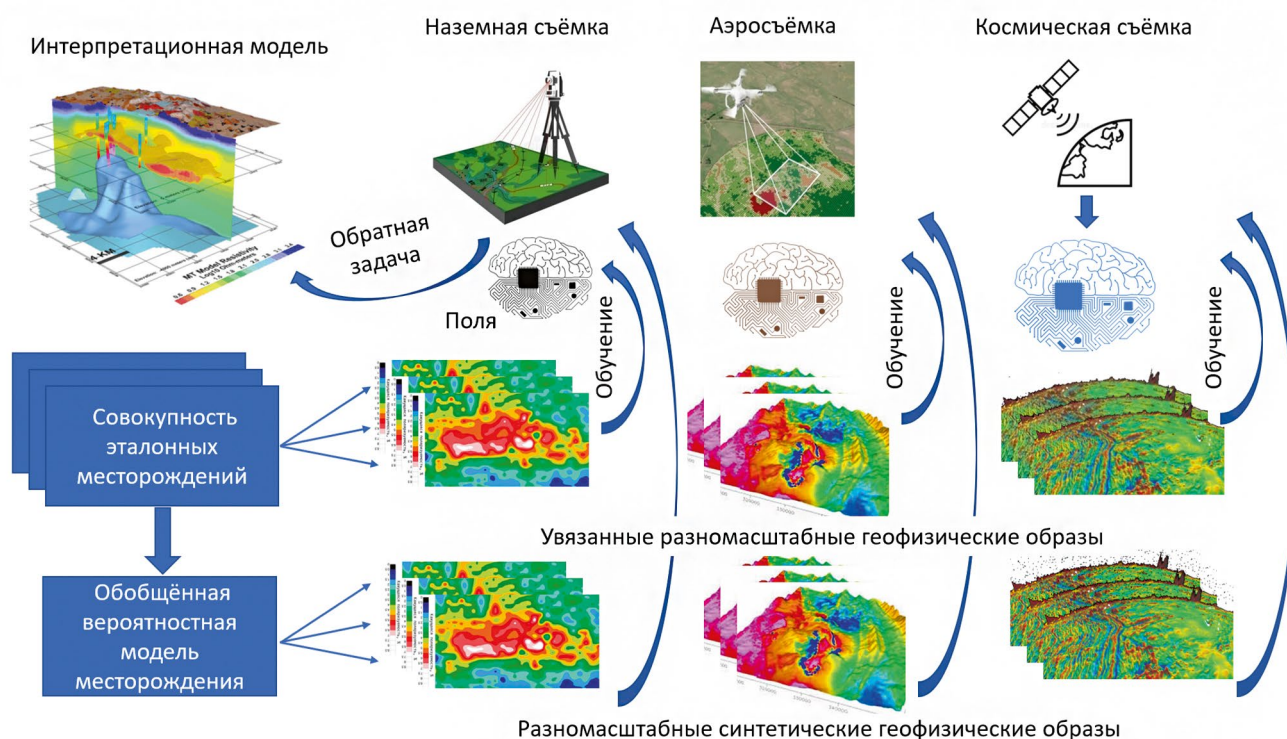


Рис. 1. Принципиальная схема поиска и разведки месторождений стратегического минерального сырья на основе разномасштабных геофизических исследований и методов распознавания образов

ющим месторождениям. Формализация этого опыта и дальнейшее генерирование набора вероятных моделей могут быть выполнены на основе комбинации методов теории вероятности, нечёткой логики и генеративных нейронных сетей. В результате удастся создать разномасштабные синтетические геофизические образы месторождений, которые также могут послужить материалом для обучения алгоритмов распознавания.

Применение обученных алгоритмов к результатам спутниковых и мелкомасштабных аэросъёмок позволит выделить перспективные для дальнейшего опoisкования участки. Очевидно, что результаты работы алгоритмов должны быть критически проанализированы геологами, специалистами по рудным месторождениям с целью их геологически обоснованной приоретизации. На выделенных приоритетных участках описанный граф обработки данных повторяется, но уже с использованием данных съёмок более крупного масштаба: фондовых (при наличии), либо специально проводимых съёмок с использованием воздушных судов, в том числе беспилотных. На этом этапе перспективно использование результатов аэроэлектрических зондирований. В случае подтверждения перспективности участков производится их дальнейшая детализация и на её основе — планирование крупномасштабных наземных съёмок и геофизических исследований методами сейсморазведки и электроразведки.

После подтверждения наличия месторождения работы переходят в стадию детальной разведки залежи. Здесь следует активно применять методы высокоразрешающей сейсмо- и электроразведки с обработкой и интерпретацией данных, основанных на высокопроизводительных вычислениях. Решающее значение также имеет развитие геофизических исследований в скважинах. Важно отметить, что в последние годы в связи с актуальностью инженерно-геофизических изысканий при строительстве объектов инфраструктуры отечественной геофизической школой был накоплен значительный опыт проведения малоглубинных геофизических исследований высоконеоднородных геологических сред, который может быть успешно использован при решении рудных задач. Следует отдельно отметить уникальный комплекс электроразведочных технологий, в частности скважинных методов, разработанный в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН под руководством академика М.И. Эпова.

Итогом геофизических исследований становится интерпретационная модель месторождения, построенная по результатам комплексной интерпретации всей совокупности геофизических данных и данных бурения с участием геолога, специалиста по конкретному типу месторождений. Применение описанной методологии может существенно интенсифицировать опoisкование обширных

труднодоступных территорий и сократить затраты на геологоразведку за счёт применения методов дистанционного зондирования, искусственного интеллекта и правильной приоретизации направлений работ.

Повышение эффективности добычи полезных ископаемых на основе геофизического мониторинга. К настоящему времени близки к исчерпанию легко извлекаемые запасы многих полезных ископаемых — как углеводородов, добываемых без применения специальных технологий интенсификации притока, так и ряда твёрдых полезных ископаемых, например алмазов, добываемых карьерным способом. В этих условиях особое значение приобретает повышение эффективности добычи, причём не только на старых месторождениях, но и при освоении новых нетрадиционных ресурсов. Помимо повышения эффективности добычи, мониторинг служит необходимым элементом системы снижения рисков чрезвычайных ситуаций при разработке месторождений, включая аварийность при бурении и эксплуатации скважин и при организации горных выработок.

Повышение эффективности добычи углеводородов входит в число приоритетов, сформулированных в Стратегии научно-технологического развития России, утверждённой Указом Президента РФ № 145 от 28.02.2024 г. (п. 21.6), а технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды и снижения рисков чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера отнесены к перечню критических технологий, определённых Указом Президента РФ № 259 от 18.06.2024 г. (п. 19). Применительно к месторождениям полезных ископаемых такие технологии в своём большинстве основаны на геофизических методах исследования.

Наиболее распространённый и эффективный способ геофизического мониторинга разработки месторождений углеводородов — проведение повторных сейсмических съёмок (4D-сейсморазведка), а также гравиметрический мониторинг и методы электрического каротажа в скважинах. Сопоставление результатов съёмок, полученных в последовательные периоды времени, позволяет судить о сопровождающих разработку изменениях в коллекторе и покрышках. Наиболее ярко могут быть выражены изменения положения водонефтяного, газонефтяного или водогазового контактов, происходящие вследствие сокращения объёма углеводородов в пласте. Применяемые в комплексе с современными методами физики горных пород материалы повторных сейсмических съёмок позволяют количественно оценивать изменения параметров многофазного флюидонасыщения и эволюции фильтрационно-ёмкостных свойств [13], включая формирование и деградацию трещиноватости коллектора. На основании этих сведений можно судить о скорости и направлениях миграции флюидов,

контролировать формирование локальных изолированных залежей и вносить необходимые коррективы во флюидодинамическую модель месторождения, планы бурения и стратегию разработки.

Наряду с фиксацией изменений непосредственно в коллекторе сейсмический мониторинг обеспечивает возможность контроля герметичности и стабильности покрышек, обнаружения путей утечки углеводородов, активации разломов. В комплексе с методами резервуарной геомеханики и физики горных пород данные сейсмического мониторинга позволяют судить об изменениях напряжённо-деформированного состояния среды месторождения. Эта информация необходима для правильного планирования применения методов интенсификации притока, включая гидравлический разрыв пласта (ГРП), а также для предотвращения аварийности на действующих и бурящихся скважинах, снижения рисков загрязнения окружающей среды.

Помимо повторных сейсмических съёмок (активный мониторинг) целесообразно применять пассивный мониторинг процесса разработки, то есть регистрацию процессов сейсмоакустической эмиссии, сопровождающей разработку. Пассивный сейсмоакустический мониторинг при проведении гидроразрыва пласта позволяет реконструировать фактические параметры трещины гидроразрыва (направление развития, высоту и длину) и вносить необходимые коррективы в планирование последующих ГРП. Источниками акустической эмиссии также могут выступать активизация разломов и процессы фильтрации. Пассивный мониторинг разработки целесообразно проводить с использованием как наземных, так и скважинных методов регистрации.

Эффективность систем 4D-мониторинга практически доказана более чем 15-летним опытом успешной работы западных добывающих компаний на Северном море, увеличивших сроки службы своих месторождений на 10–15 лет с экономическим эффектом в сотни миллионов долларов.

Специфика задач геофизического мониторинга предъявляет особые требования к используемым аппаратно-программным комплексам. Уровень дифференциального сигнала, отвечающего изменениям в залежи, как правило, невелик, и для его устойчивого обнаружения и интерпретации необходимо минимизировать помехи и искажения. Это, в частности, означает необходимость весьма точного повторения геометрии съёмки — положения пунктов регистрации и возбуждения. Особую сложность эта задача представляет при мониторинге месторождений углеводородов на шельфе. Повторные сейсмические съёмки с плавающими регистрирующими косами малоэффективны для целей мониторинга как вследствие высокого уровня шумов, так и из-за невозможности точного повторения геометрии

съёмки. Съёмки с использованием автономных донных станций более предпочтительны из-за меньшего уровня шума, однако необходимость подъёма станций между последовательными сериями съёмки для считывания данных и зарядки аккумуляторов не позволяет точно выдерживать геометрию. Кроме того, оба указанных способа пригодны только для активного мониторинга.

Перечисленных недостатков лишены донные регистрирующие системы (косы), устанавливаемые на дне акватории на весь период эксплуатации месторождения и позволяющие передавать данные в режиме реального времени. Однако разработка, производство и установка таких систем — технически сложная задача, поскольку к ним предъявляются повышенные требования надёжности: продолжительность функционирования системы без возможности технического обслуживания её элементов должна достигать десятков лет.

Наиболее перспективная технология для достижения требуемых показателей предполагает использование оптоволоконных сенсоров: низкое энергопотребление, инертность по отношению к морской воде и электромагнитным помехам, высокая стабильность, относительно малый вес и компактность, низкая стоимость (для ряда конкретных конструкций) единичного датчика — всё это делает оптоволоконные технологии весьма удобными для организации систем мониторинга. Вместе с тем наиболее распространённые конструкции оптоволоконных сейсмических датчиков (на принципе обратного рассеяния [14] и на основе решёток Брегга [15]) не лишены существенных недостатков: узкая диаграмма направленности, малый динамический диапазон, сложная амплитудно-частотная характеристика и распределённый характер датчиков на обратном рассеянии, чувствительность к температуре [16].

Можно констатировать, что, несмотря на очевидные перспективы и быстрое развитие оптоволоконных систем сейсмического мониторинга, до настоящего времени не разработана единая технология (конструкция), которая обладала бы необходимой универсальностью для её тиражирования. Мировая практика такова, что систем сейсмического 4D-мониторинга в продаже нет, они разрабатываются под конкретное месторождение по заказу добывающих или сервисных компаний. Среди производителей можно выделить Sercel Optoplan и Alcatel Submarine Networks, создавших системы Ekofisk LoFS (месторождение Ekofisk и Valhall в Северном море) и Optoplan (месторождение Johan Sverdrup также в Северном море).

Учитывая высокий мировой уровень отечественных научных школ в области фотоники и оптоволоконных технологий, наличие собственного производства оптического волокна и лазерных систем, можно утверждать, что российские учёные обладают

хорошим заделом не только для успешного создания аналогов зарубежных образцов, но и для разработки более совершенных оптоволоконных систем сейсмической регистрации и мониторинга. Для этого необходимо объединить усилия геофизиков и оптиков, что уже происходит.

Необходимость геофизического мониторинга связана не только с разработкой месторождений углеводородов, но и с другими задачами развития минерально-сырьевой базы, строительства, а также с проблемами снижения углеродного следа. В частности, по мере увеличения глубины горных выработок становится невозможной добыча алмазной руды карьерным способом. Вместе с тем более глубокие горизонты кимберлитовых трубок содержат достаточные для экономически эффективной разработки запасы алмазного сырья. Взрывные работы при добыче подземным способом могут приводить к дроблению кристаллов и снижению стоимости алмазов. Поэтому перспективна добыча с использованием метода самообрушения, когда кимберлитовое тело подрезается, после чего обрушение породы происходит под собственным весом [17]. Однако такой метод невозможен без постоянного мониторинга процесса обрушения, который гарантировал бы контроль полноты выработки и безопасность работ. Наиболее эффективным способом такого мониторинга служит пассивный непрерывный сейсмоакустический мониторинг, для осуществления которого целесообразно применять оптоволоконные датчики. Сходная ситуация складывается при мониторинге процессов разработки калийных солей [18] и других твёрдых полезных ископаемых.

Помимо сейсмоакустического мониторинга высокой информативностью обладает высокоточный мониторинг деформаций земной поверхности в пределах разрабатываемых месторождений углеводородов и твёрдых полезных ископаемых, а также подземных хранилищ газа. Целесообразно комплексирование наземного геодезического и гравиметрического мониторинга, а также применение систем радарной спутниковой интерферометрии. До последнего времени такой мониторинг вёлся с использованием материалов зарубежных спутниковых систем, однако в связи с введением недружественными странами санкционного режима получение таких снимков стало практически невозможным. Недавно состоявшийся запуск первого отечественного спутникового радара с возможностью интерферометрической съёмки «Кондор-ФКА» должен восполнить этот пробел.

Следует отметить, что разработка программного обеспечения для обработки и интерпретации геофизических данных (в том числе получаемых с помощью систем радарной спутниковой интерферометрии), моделирования геологических объектов и геологоразведки в целом — одна из важнейших

задач. Согласно оценкам, приведённым в Стратегии развития минерально-сырьевой базы, доля зарубежного программного обеспечения в этом секторе отечественного рынка достигает 90%, что создаёт неприемлемые риски для технологического суверенитета в геологоразведочной отрасли.

Обеспечение сейсмической и вулканической безопасности. Актуальность задач сопровождения строительства и жизнедеятельности в сейсмоопасных и вулканоопасных районах (особенно при возведении АЭС, трубопроводов, мостов и иных особо ответственных объектов) сегодня возрастает. Это связано с рядом факторов, в числе которых перенаправление транспортных коридоров в восточном направлении — через районы высокого сейсмического риска и активного вулканизма, увеличение этажности и конструкционной сложности объектов строительства, повышение требований к промышленной и экологической безопасности. Существует настоятельная необходимость качественного обновления подходов к оценке сейсмической опасности, то есть вероятности величины ожидаемых воздействий на конкретный объект (территорию) от всех известных сейсмических источников. Технология такой оценки достаточно проработана и применяется на различных масштабных уровнях, подразделяемых на общее сейсмическое районирование (ОСР) и детальное сейсмическое районирование (ДСР). Для целей ОСР и ДСР практически везде в мире наиболее широко используется модель приуроченности сильных землетрясений к активным тектоническим разломам. В России с 1997 г. в ОСР реализуется её вариант — линеаментно-доменная модель зон возможных очагов землетрясений. 25-летний опыт её применения свидетельствует о необходимости совершенствования подходов к определению этих зон. Оказывается, что значительная доля новых землетрясений происходит в местах, где катаклизмы большой разрушительной силы не ожидалось, и наоборот, в среднем опасность возникновения сильных землетрясений на обширных территориях оказывается завышенной.

Существенный недостаток линеаментно-доменной модели состоит в низкой региональной сеймотектонической изученности территории России и во многом субъективном характере картирования сейсмолинеаментов. Нуждаются в совершенствовании подходы к моделированию сейсмического режима, включая оценку максимальной возможной магнитуды. В настоящее время разрабатываются методы распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений с использованием элементов искусственного интеллекта и системного анализа [19].

Совершенствование системы ОСР предполагает обновление научной сейсмологической и сеймотектонической основы (то есть базового каталога землетрясений, включая палео-, архео- и историче-

ские сейсмособытия, методы и алгоритмы расчёта) и модернизацию процедуры применения результатов ОСР. В части повышения качества научной сейсмологической основы необходимо сосредоточить усилия на основных источниках ошибок сейсмического районирования: речь идёт о недостатках моделирования сейсмического режима, низкой представительности базового каталога и низкой сейсмотектонической изученности. Моделирование воздействий от конкретных землетрясений с учётом амплитудно-частотных параметров их очагов, локальных грунтовых условий, характеристик сооружений также составляет важную часть современных подходов к оценке сейсмической опасности. Для усовершенствования и проверки таких моделей следует развивать сеть акселерометров, регистрирующих воздействия от землетрясений на конкретные здания и сооружения.

Важно научно обосновать и утвердить максимально прозрачную и понятную процедуру составления и утверждения карт ОСР. Современные технологии с возможностью быстро проводить расчёт интенсивности по данным о сейсмогенерирующих структурах и каталогу землетрясений позволяют предложить новую концепцию цифровой карты ОСР, которая поможет существенно повысить точность и прозрачность всего процесса. При этом вместо карты целесообразно утверждать сам алгоритм расчёта интенсивности сейсмических воздействий на основе модели сейсмогенерирующих структур и каталога землетрясений. Периодическое обновление соответствующих данных позволит вносить уточнения в цифровую карту только в тех регионах, где данные обоснованно уточнены.

Внедрение новых подходов к оценке сейсмической опасности будет способствовать существенно снижению сопутствующих рисков и повышению экономической эффективности строительства. Более подробно соответствующие вопросы освещены в работе [20].

* * *

На протяжении столетия геофизическая наука играет неотъемлемую роль в укреплении суверенитета и безопасности нашей страны, включая обеспечение экономики минеральным сырьём, выявление риска землетрясений и вулканических извержений, решение вопросов обороны. Значение прикладной геофизики возрастало в кризисные моменты истории, когда возникала необходимость качественной перестройки технологического уклада. В настоящее время роль этой важнейшей области науки определяется, во-первых, необходимостью скорейшей разведки и эффективной разработки месторождений стратегических видов минерального сырья, которые, как указано в Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2050 года, “являются особо важными для устойчи-

вого функционирования и стратегического развития национальной экономики, обеспечения национальной обороны и безопасности и удовлетворения потребностей высокотехнологичных секторов промышленности”.

В этой связи следует в первую очередь сосредоточить усилия на поисках и разведке экономически эффективных месторождений стратегических твёрдых полезных ископаемых — руд металлов и неметаллов. Особенности их размещения на территории России увеличивают значение разномасштабных (от космических до наземных) геофизических исследований для решения этой задачи. Не менее актуально развитие методов геофизического мониторинга разработки месторождений углеводородов и твёрдых полезных ископаемых с целью повышения эффективности их добычи и снижения риска природно-техногенных аварий и экологического ущерба. Расширение инфраструктуры и перестройка транспортных коридоров на востоке России усиливают роль геофизики в обеспечении сейсмической и вулканической безопасности объектов, расположенных в зонах сейсмического и частично вулканического риска.

Решение перечисленных задач в условиях санкций недружественных стран, которые прямо затрагивают поставки геофизического оборудования и программного обеспечения, требует масштабной работы по созданию соответствующих отечественных продуктов. Достижения отечественных научных школ в области геофизики, физики, механики, фотоники и оптоволоконных технологий, молекулярной электроники, вычислительной математики и математического моделирования, космического приборостроения, искусственного интеллекта позволяют не просто заместить зарубежные аналоги, но создать передовые геофизические технологии.

В целях обеспечения технологического суверенитета в геолого-геофизической отрасли необходимо объединить усилия не только геофизиков, но и широкого круга учёных и специалистов — геологов, физиков, математиков. Поэтому целесообразно рассмотреть вопрос о геофизическом сопровождении развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации, обеспечении технологического суверенитета в геолого-геофизической отрасли, геофизической безопасности территории России в рамках комплексной научно-технической программы, реализуемой консорциумом научных и научно-производственных организаций под общим научно-методическим руководством Российской академии наук.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Статья подготовлена в рамках Государственного задания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Merchant B.* Everything that's inside your iphone // Motherboard. 2017.
2. *Волков А.В., Сидоров А.А.* Минеральное богатство Тихоокеанского рудного пояса // Вестник РАН. 2019. Т. 89. № 2. С. 157–165. DOI: 10.31857/S0869-5873892157-165
Volkov A.V., Sidorov A.A. The mineral wealth of the Pacific Ore Belt // Herald of the RAS. 2019, vol. 89, no. 2, pp. 157–165. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0869-5873892157-165
3. *Волков А.В., Сидоров А.А.* Недра российской Арктики — кладовая металлов для “зелёных” технологий // Вестник РАН. 2020. Т. 90. № 1. С. 56–62. DOI: 10.1134/S1019331620010141
Volkov A.V., Sidorov A.A. The Interior of the Russian Arctic: A Trove of Metals for Green Technology // Herald of the RAS. 2020, vol. 90, no. 1, pp. 73–78. DOI: 10.1134/S1019331620010141
4. *Середин В.В., Кременецкий А.А., Трач Г.Н. и др.* Новый потенциально промышленный тип иттриево-земельной минерализации в Юго-Западном Приморье // Разведка и охрана недр. 2006. № 9–10. С. 37–42.
Seredin V., Kremeneckij A., Trach G. et al. A new potentially industrial type of REY mineralization in southwestern Primorye // Prospect and protection of mineral resources. 2006, no. 9–10, pp. 37–42. (In Russ.)
5. Глава Минприроды Сергей Донской: нефти в России осталось на 29 лет, а газа — на 80. // E²nergy. 2017. <https://eenergy.media/news/3291>
The head of the Ministry of Natural Resources and Environment Sergey Donskoy: There are 29 years of oil left in Russia, and 80 years of gas left. // E²nergy. 2017. (In Russ.) <https://eenergy.media/news/3291>
6. International Energy Agency. Resources to Reserves 2013: Oil, Gas and Coal Technologies for the Energy Markets of the Future. — OECD Publishing, 2013.
7. *Дерягин Б.В.* Пётр Петрович Лазарев (К столетию со дня рождения) // Успехи физических наук. 1978. Т. 125. № 5. С. 11–18. DOI: 10.3367/UFNr.0125.197805c.0011
Deryagin B. Petr Petrovich Lazarev (on the one-hundredth anniversary of his birth) // Physics-Uspekh (Advances in Physical Sciences). 1978, vol. 125, no. 5, pp. 11–18. (In Russ.) DOI: 10.3367/UFNr.0125.197805c.0011
8. *Соболев С.Л., Михлин С.Г.* Математическая сейсмология в СССР. // Успехи математических наук. 1936. № 1. С. 228–255.
Sobolev S., Mikhlin S. Mathematical Seismology in the USSR // Russian Mathematical Surveys. 1936, no. 1, pp. 228–255. (In Russ.)
9. *Калашикова Л.А.* Академик Григорий Александрович Гамбургцев: к 115-летию со дня рождения // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. № 3 (22). DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-22.art44
Kalashnikova L.A. Academician Grigory Alexandrovich Gamburtsev: to the 115th anniversary of his birth // Actual Problems of Oil and Gas. 2018, no. 3 (22). (In Russ.) DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-22.art44
10. *Васильев А.П.* Об основополагающем вкладе академика Г.А. Гамбургцева в создание систем дальнего обнаружения ядерных взрывов // Актуальность идей Г.А. Гамбургцева в геофизике XXI века. М.: Янус-К, 2013. С. 64–80.
Vasiliev A.P. On the fundamental contribution of academician G.A. Gamburtsev to the development of long-range detection systems for nuclear explosions // The relevance of G.A. Gamburtsev's ideas in geophysics of the XXI century. Janus-K, 2013. pp. 64–80. (In Russ.)
11. *Брехунцов А.М.* История открытия и освоения месторождений углеводородов в Западной Сибири // Нефтегазовая вертикаль. 2016. № 6. С. 17–20.
Brekhuncov A.M. The history of the discovery and development of hydrocarbon deposits in Western Siberia // The oil and gas vertical. 2016, no. 6, pp. 17–20. (In Russ.)
12. *Волков А.В., Сидоров А.А., Галямов А.Л., Чижова И.А.* Вопросы глобальной металлогенической зональности Тихоокеанского рудного пояса: выводы для прогнозно-металлогенических исследований на Востоке России // Отечественная геология. 2018. № 4. С. 18–25. DOI: 10.24411/0869-7175-2018-10002
Volkov A.V., Sidorov A.A., Galyamov A.L., Chizhova I.A. Issues of global metallogenic zonality of the Pacific ore belt: conclusions for predictive metallogenic studies in the East of Russia // National Geology. 2018, no. 4, pp. 18–25. (In Russ.) DOI: 10.24411/0869-7175-2018-10002
13. *Bayuk I.O., Dubinya N.V., Garagash I.A. et al.* Multiscale rock-physics modeling of effective elastic properties of fractured reservoir rocks // Proceedings of 53rd us rock mechanics/geomechanics symposium. 2019. 19–415 ARMA conference paper. In 53rd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, American Rock Mechanics Association (ARMA) New York City, USA.
14. *Parker T., Shatalin S., Farhadiroushan M.* Distributed Acoustic Sensing — a new tool for seismic applications. // First Break. 2014, vol. 32 (2), pp. 61–69. <https://doi.org/10.3997/1365-2397>
15. *Wang Y., Hongyu Y., Xin L. et al.* A Comprehensive Study of Optical Fiber Acoustic Sensing. // IEEE Access. 2019, vol. 7, pp. 85821–85837. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2924736
16. *Тихоцкий С.А., Чулков Е.* Исследование возможности создания сейсмических датчиков на основе оптического волокна с заданной диаграммой направленности // BalticPetroModel-2022.

- Петрофизическое моделирование осадочных пород: Труды VI Балтийской научно-практической конференции, Петергоф, 19–21 сентября 2022 г. Тверь: ПолиПРЕСС, 2022. С. 47–51.
- Tikhotskiy S.A., Chulkov E.* On the possibility to design fiber optics seismic sensors with the prescribed angular sensitivity diagram // *BalticPetroModel-2022. Petrophysical modeling of sedimentary rocks: Proceedings of the VI Baltic Scientific and Practical Conference, Peterhof, September 19–21, 2022. Tver: PoliPRESS, 2022. Pp. 47–51. (In Russ.)*
17. Кузьмин Е.В., Баранов А.В. Управляемое самообрушение руды при подземной добыче // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2009. № 6. С. 9–15.
Kuzmin E.V., Baranov A.V. The controlled ore caving during the underground mining // *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2009, no. 6, pp. 9–15. (In Russ.)
 18. Чугаев А.В. Результаты мониторинга потенциально-опасного участка Верхнекамского месторождения калийных солей методом многоканального анализа поверхностных волн // Горное эхо. 2021. № 3 (84). С. 68–73. DOI: 10.7242/echo.2021.3.13
Chugaev A.V. The results of monitoring of a potentially hazardous area of the Verkhnekamskoye potassium salt deposit using the method of multichannel analysis of surface waves // *Mountain Echo*. 2021, no. 3 (84), pp. 68–73. (In Russ.) DOI: 10.7242/echo.2021.3.13
 19. Gvishiani A., Dzeboev B., Dzeranov B. et al. Strong Earthquake-Prone Areas in the Eastern Sector of the Arctic Zone of the Russian Federation // *Applied Sciences*. 2022, vol. 12, no. 23. (SI: Geoinformatics and Data Mining in Earth Sciences).11990. DOI: 10.3390/app122311990
 20. Шебалин П.Н., Тихоцкий С.А., Коваленко А.А. О совершенствовании подходов к сокращению ущерба от землетрясений // Вестник РАН. 2024. № 10. С. 886–895.
Shebalin P., Tikhotskiy S., Kovalenko A. On improving approaches to reducing earthquake damage // *Herald of the RAS*. 2024, no. 10, pp. 886–895. (In Russ.)

ON THE CURRENT DIRECTIONS OF THE DEVELOPMENT OF GEOPHYSICS IN ORDER TO ACHIEVE THE TECHNOLOGICAL SOVEREIGNTY OF THE RUSSIAN FEDERATION

S.A. Tikhotskiy^{a,b,*}

^a*Schmidt Institute of physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Moscow Institute of Physics and Technology, MIPT, Moscow, Russia*

*E-mail: sat@ifz.ru

The article provides the most urgent tasks of geophysics to ensure technological sovereignty of the Russian Federation in modern conditions. A brief overview of the role of applied geophysics in the development of the economy, ensuring the sovereignty and security of the country since the beginning of the XX century is given and historical parallels with the modern stage are drawn. It is stated that geophysical research has repeatedly been essential for solving the most important tasks of the country's development. Currently the most important task of applied geophysics is to provide all industries and, first of all, high-tech industries with the necessary mineral resources. The most important directions of geophysical research are substantiated including the search and exploration of economically efficient deposits of strategic mineral raw materials, increasing the efficiency of production of hydrocarbons and solid minerals based on geophysical monitoring and ensuring geophysical safety. It is noted that the achievement of the relevant goals is impossible without ensuring the technological sovereignty of the geophysical industry itself, which means the need to create modern domestic geophysical instruments, equipment, software and technologies. Some main directions of development of geophysical technologies are outlined. It is stated that in order to make a technological breakthrough in the geophysical industry it is necessary to combine the efforts of scientists of various professions: geophysicists, geologists, physicists and mathematicians.

Keywords: geophysics, technological sovereignty, mineral resources base, strategic mineral deposits, geophysical monitoring, hydrocarbon recovery efficiency, seismic safety.