

О развитии технических средств регистрации сейсмического сигнала и вибрационной сейсморазведки.

Часть 1. Системы регистрации

■ Жуков А.П., Горбунов В.С., ООО «Геофизические системы данных», г. Москва

"Можно уподобить всякое землетрясение фонарю, который зажигается на короткое время и освещает нам внутренность Земли, позволяя рассмотреть то, что там происходит".

Б.Б. Голицын

Современного уровня сейсморазведка достигла не сразу. Ей предстоял долгий и нелегкий путь от примитивных приборов до высокотехнологичных и высокоточных систем. Благодаря достижениям науки и техники, оборудование и конструкция сейсморазведочных станций постоянно совершенствовались – уменьшался их размер, расширялся динамический диапазон, происходил экспоненциальный рост числа используемых для регистрации каналов и «канальности» сейсмостанций.

Цель настоящего обзора – проследить, как развивались технические средства сейсмической разведки с момента их зарождения до настоящего времени. Представляется важным показать, как создавались все более совершенные образцы сейсмической аппаратуры, впитывая все последующие достижения

в радиоэлектронике, физике и других смежных областях науки и техники. Кроме того, необходимо отдать дань уважения компаниям-первопроходцам, сыгравшим ключевую роль в создании сложнейшей сейсморазведочной аппаратуры. Просим заранее извинить за неточности, которые могут встретиться в обзоре.

Эволюция систем регистрации сейсмических данных

Еще в 132 г. китайский ученый Чжан Хэн создал первый известный в истории сейсмоскоп (Рис. 1) – устройство, способное фиксировать землетрясения. Этот прибор мог определять только направление к эпицентру землетрясения, но не имел возможности записи сейсмических событий. Конструкция сейсмоскопа была проста: внутри медного сосуда диамет-

▼ Рис. 1. Сейсмоскоп Чжан Хэна. 132 г. Реконструкция [1].



ром около двух метров располагался статический маятник, а на поверхности сосуда по азимутам находились восемь отверстий в виде головы дракона с закрепленными шариками. Головы драконов были связаны с маятником рычагами, поэтому, когда сейсмическая волна приводила корпус в движение, натяжение связующих элементов системы заставляло разжимать челюсти головы дракона, и шарик падал в пасть бронзовой лягушки, находящейся у подножия сейсмоскопа, показывая направление эпицентра землетрясения.

Прошло более полутора тысяч лет, и на другом конце света, в Италии в 1855 г. Луиджи Пальмиери сконструировал прибор для регистрации землетрясений. Принцип работы этого сейсмоскопа был в общих чертах похож на китайский, только в данном случае в роли шариков выступала ртуть. В зависимости от направления прихода сейсмической волны ртуть проливалась в специальную емкость, которая блокировала ход часов, фиксируя время сейсмического события [2].

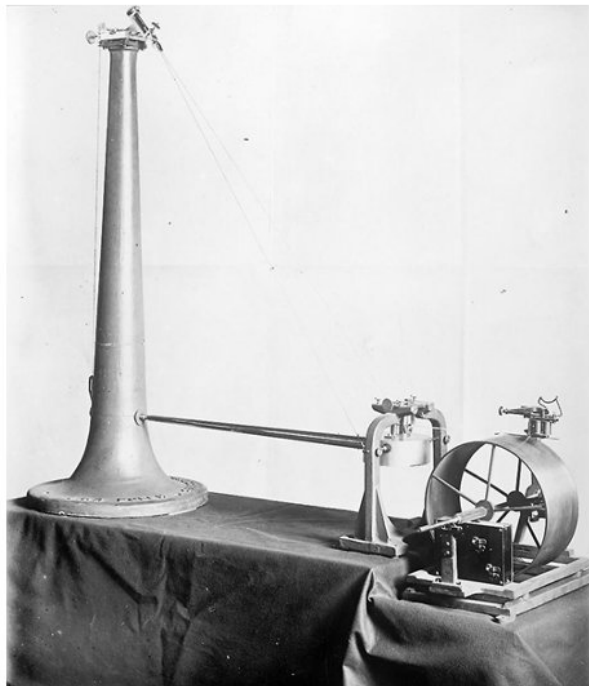
Первая известная попытка использования искусственного землетрясения (взрыва) для изучения упругих свойств геологической среды была осуществлена английским ученым Р. Маллетом в 1846 г. Подобный опыт повторил немецкий ученый Пафф (1873 г.), а затем американец Эббот (1878 г.). Однако для точной регистрации времени прихода волны их сейсмоскопы не обладали достаточной чувствительностью. Новая попытка усовершенствования была предпринята Л. Фуко и М. Леви в 80-х гг. XIX в., которые, изучая распространение упругих волн в земле, регистрировали амплитуды колебаний поверхности ртути в емкости с помощью фотографического аппарата [3,4].

Прямая запись на бумагу

Первые сейсмографы были разработаны в конце XIX в. и служили для регистрации и измерения движений грунта во время землетрясений. Сейсмографы были механическими: колебания корпуса относительно маятника с помощью рычагов усиливались и передавались на перо, оставлявшее следы на барабане, покрытом закопченной бумагой. Таким образом, осуществлялась прямая механическая запись.

В конце XIX в. в Японии группа английских физиков – Джеймс Альфред Юинг, Томас Грей и Джон Милн – создала простой и удобный сейсмограф, получивший широкое распространение в сейсмологии [5]. В это же время в Европе, особенно в Германии, активно развивались методы и инструменты для записи сейсмических колебаний. В этой области особенно выделялись исследования Э. Вихерта. В процессе создания сейсмографов Вихерт и Милн столкнулись с проблемой трения элементов системы механических сейсмографов (в том числе и трения пера о бумагу), что не позволяло повысить чувствительность приборов. Единственное разрешение проблемы виделось в увеличении массы маятника и длины плеча рычага для получения большого момента инерции, чтобы минимизировать влияние трения (Рис. 2). Так, Вихерт в своих экспериментах довел массу маятника сейсмографа до тонны с длиной плеча в несколько метров, чтобы регистрировать слабые землетрясения.

К концу XIX в. казалось, что усовершенствование механических сейсмографов практически достигло своего предела. Но в то время параллельно с Вихертом разработкой чувствительного сейсмографа занимался князь Борис Борисович Голицын (1862–1916) – физик, сейсмолог, академик Императорской Академии



▲ Рис. 2. Сейсмограф системы Вихерта (Bosch type) [6].

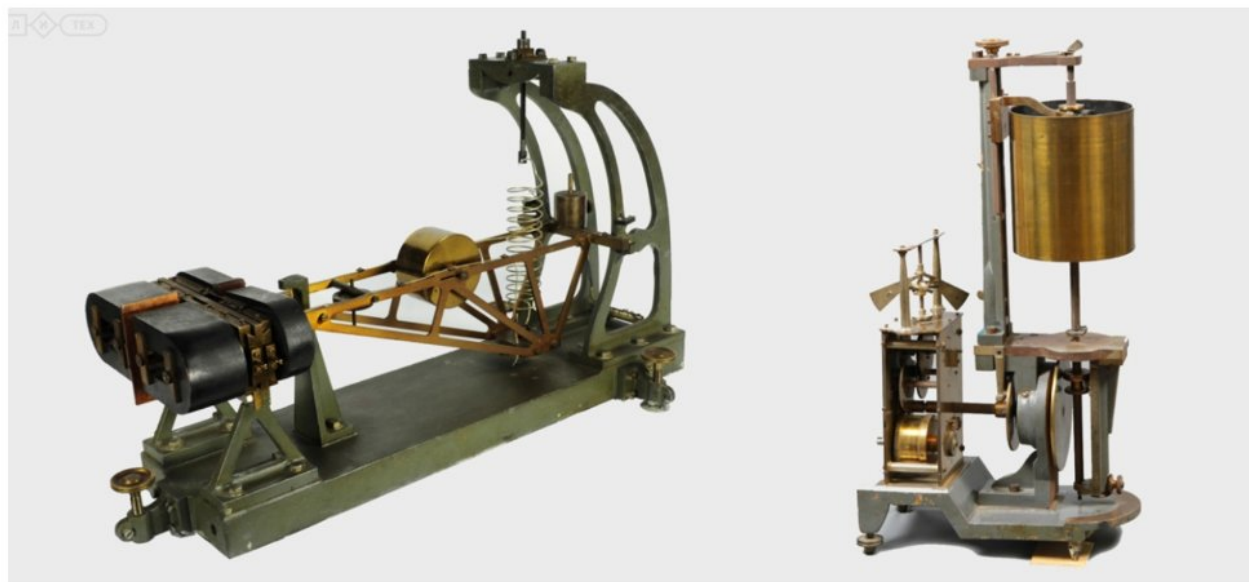
наук, внесший весомый вклад в развитие сейсмологии (о чем зарубежные коллеги скромно умалчивают). Голицын читал курсы электричества и магнетизма, термодинамики, теории упругости, акустики, высшей оптики в Морской академии. В 1903 г. он описал горизонтальный электромагнитный сейсмограф с гальванометрической регистрацией, а уже в 1906 г. установил его в Пулковской

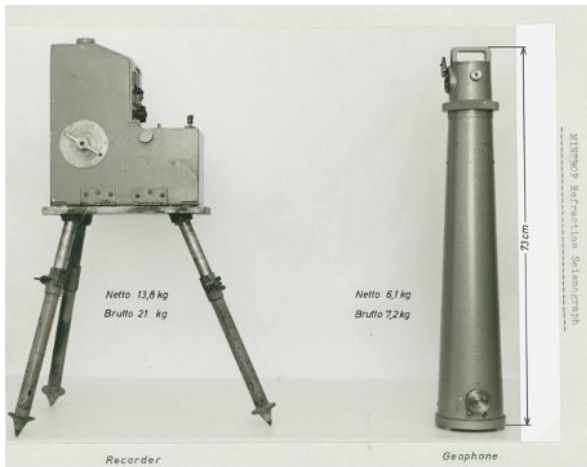
астрономической обсерватории. Это было принципиально новое устройство, в котором механические колебания маятника преобразовывались в электрический сигнал посредством электромагнитной индукции. Возникающий электрический ток при помощи зеркального гальванометра светолучевым методом записывался на движущуюся осциллографическую бумагу, предназначенную для фотографической записи колебательных процессов в световых осциллографах с лампами накаливания.

Б.Б. Голицын привлек известного инженера Г.А. Мазинга к созданию первых сейсмографов (Рис. 3). В 1910 г. Голицын изготовил первый вертикальный сейсмограф с гальванометрической регистрацией.

Понимая всю важность своего изобретения для развития науки, Голицын не стал его патентовать, а наоборот, поделился результатами своих работ и чертежами устройства своих сейсмографов со многими научными учреждениями Старого и Нового Света. Разработанный Голицыным принцип гальванометрической регистрации и по сей день применяется в сейсмоприемниках. Фактически

▼ Рис. 3. Горизонтальный (слева) и вертикальный (справа) сейсмографы Голицына [7].





▲ Рис. 4. Сейсмограф Минтропа. Детектор сейсмических волн (справа) и регистратор волн (слева) [6].

любой современный сейсмограф можно назвать усовершенствованным «сейсмографом Голицына».

В 1914 г. в Германии Людгер Минтроп, коллега Вихерта, запатентовал метод первых вступлений и разработал первый компактный механический сейсмограф, который состоял из двух частей: детектора сейсмических волн и регистратора (Рис. 4). Детектор представлен металлическим шаром, подвешенным на пружине. Во время прихода сейсмических волн вертикальное движение массы отклоняет горизонтально зеркало, установленное на вершине перевернутого конуса. Луч от источника света в регистраторе, направленный на зеркало, отражается обратно и фиксируется на движущейся светочувствительной бумаге. Так происходит регистрация движения шара детектора и, следовательно, сейсмических волн [8].

Опробование новой технологии и оборудования произошло в 1921 г. в Германии, где был обнаружен первый соляной купол. Успешные сейсморазведочные работы для поиска нефти и газа компания Минтропа «SEISMOS» (позже «PRAKLA-SEISMOS») проводила и в США (Рис. 5). В конце 1924 г. был обнаружен

соляной купол на побережье Мексиканского залива в Техасе (нефтяное поле «Moog», более известное как «Orchard»). Сейсмограф Минтропа использовался в 20-е и 30-е годы исключительно для поиска соляных куполов методом преломленных волн в районе Мексиканского залива. Почему именно соляных куполов? Пластичная соль прорывает вышележащие слои, деформируя их и изгибая вверх. По пористым вмещающим породам нефть мигрирует вверх, упираясь в непористую соль, благодаря чему образуются отличные ловушки углеводородов. Скорость прохождения сейсмических волн в соли в два раза выше, чем во вмещающих осадочных горных породах, поэтому значительное сокращение времени пробега волны является явным признаком наличия соляного купола и легко обнаруживается сейсмическими методами. По этой причине большая часть соляных куполов в регионе Мексиканского залива была открыта именно сейсморазведкой.

«SEISMOS» в 20-е годы монополизировала рынок сейсморазведки. Сейсмографы Минтропа и их чертежи невозможно было купить или украсть, при проведении полевых работ оборудование находилось под вооруженной охраной, а иной раз Минтроп мог лично досматривать вещи своих сотрудников. Кроме того, метод интерпретации полученных данных был описан лишь в общих чертах,

▼ Рис. 5. Подготовка к полевым работам. «SEISMOS», начало 30-х годов.



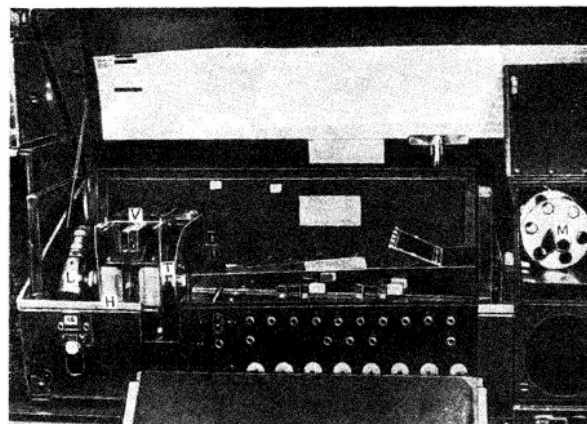


▲ Рис. 6. Сейсмограф вертикальный. «Petty Geophysical», 1925 г. [6].

и никто точно не знал, как он применяется. Однако отсутствие финансовой поддержки, нарушение патентных прав, внедрение метода отраженных волн (которым пренебрегал Минтроп) и разработка более совершенных сейсмографов другими компаниями, в первую очередь «GRC» и «Petty Geophysical», вынудили Минтропа продать патенты «Техасо» и уйти из «SEISMOS» в 1933 г. [9].

На волне успеха Минтропа многие сервисные компании правильно оценили перспективы сейсмического метода для поиска нефтяных и газовых месторождений и начали развивать теорию, методику и технические средства сейсморазведки (Рис. 6–7). Лидерами в отрасли были американцы – и сервис-

▼ Рис. 8. Процесс регистрации сейсмических данных. «Petty Geophysical», США, 20-е годы [6].



▲ Рис. 7. 10-канальный регистратор «Petty Geophysical», 1931 г. [6].

ные, и добывающие компании совместно занимались разработкой аппаратуры: «Petty Geophysical», «GRC», «GSI», «Conoco», «Texaco», «Sun Oil», «Chevron» и др. (Рис. 8–9).

С начала 30-х годов механические сейсмографы постепенно вытеснялись

▼ Рис. 9. Передвижные сеймостанции. США, 1927 г. [6].



электронными регистраторами и электромагнитными преобразователями, называемыми сейсмометрами, которые в несколько раз более чувствительны. До Второй мировой войны и 5–10 лет после ее окончания использовались большие и тяжелые электромагнитные сейсμοприемники с постоянным магнитом и механическим демпфированием (путем погружения маятника в вязкое масло). Только к началу 50-х годов, благодаря использованию более совершенных материалов и применению электромагнитного демпфирования, удалось уменьшить их до небольших размеров. Впрочем, техническая эволюция сейсμοприемников – тема, требующая отдельного и более внимательного рассмотрения.

Вернемся к истории сейсмических станций. В конце 20-х годов практически каждая компания, занимающаяся сейсморазведкой, обладала собственными разработками систем регистрации. Так, в США к концу 20-х годов использовались 4–6 канальные станции, а уже в начале 30-х появились сейсмостанции, имеющие до 10–12 каналов записи [10]. В СССР в 20-е годы использовались немецкие сейсмографы Швейдера и П.М. Никифорова (ученика Б.Б. Голицына). Бурная научно-техническая активность Г.А. Гамбурцева в 30-е годы привела к созданию различных образцов сейсморазведочной техники, например, электродинамического сейсмографа СИ-2 [11]. В 1929 г. между СССР и фирмой «Schlumberger» был подписан договор о сотрудничестве в области промысловой геофизики, в который в 1934 г. была включена также и сейсморазведка. Французской фирмой были предоставлены сейсмостанции, которые послужили прототипами первых отечественных 5-канальных станций, разработанных при активном участии сотрудников ВГКР

(Всесоюзная контора геофизических разведок, Москва): Г.А. Гамбурцева, Л.А. Рябинкина, В.В. Шаскольского, С.Н. Шишмарева, А.Н. Федоренко. Производство сейсмостанций было налажено в том же 1934 г. на заводах ЛЭФИ и «Геологоразведка» (Ленинград) [12,13]. В 1938 г. в сотрудничестве с фирмой «Schlumberger» в СССР была произведена первая отечественная 8-канальная сейсмостанция СС-8. С 1939 г. все контакты с французской фирмой были разорваны, поэтому дальнейшее развитие регистрирующей сейсморазведочной аппаратуры в СССР велось самостоятельно и весьма успешно под руководством Г.А. Гамбурцева.

К сожалению, война на несколько лет остановила серийный выпуск разработанных до 1941 г. многоканальных сейсмостанций. Однако после ее окончания возобновилось бурное производство сейсморазведочного оборудования на заводе «Нефтеприбор» (Ленинград); техника разрабатывалась в мастерских ВИРГа (Всесоюзный институт разведочной геофизики) [14]. Стали появляться более совершенные аналоговые 24-канальные сейсмостанции с прямой записью: ВИРГ-24-48, ВИРГ-24-Эхо-1 (1947), СС-24-48. Далее были разработаны сейсмостанции СС-26-51Д, СС-60-55 (Рис. 11), СС-30/60-56, СС-24П (переносная). [15].

В 40–60-е годы используются в основном 24-канальные станции (Рис. 10). Происходит усовершенствование уже существующего оборудования.

Все выше перечисленные отечественные и зарубежные сейсморазведочные станции имели характерную особенность – прямую осциллографическую запись на фотобумагу. То есть сейсмограммы сразу записывались в окончательном виде, без возможности последующего воспроизведения и обработки.



▲ Рис. 10. 24-канальная сейсмостанция. («Eng Labs» & «SIE») США, 1946 г. [6].



▲ Рис. 11. Осциллограф сейсмический ОС-60 (СС-60-55) на 12 каналов [16].

Почетный нефтяник России А. Устюжанинов так вспоминал рабочий процесс тех времен: «Молодые специалисты, приходя на современные станции, уже, наверно, не смогут представить себе темно-коричневые от постоянного пользования проявителем для фотобумаги руки своих предшественников; смонтированные в кузовах автобусов геофизические станции, внутри которых, свисая с натянутых веревок, сушились ленточки из фотобумаги, на которой в то время регистрировалась информация, пришедшая из глубин Земли».

Говоря о дальнейшем увеличении «канальности» сейсмостанций, нельзя не упомянуть о Гарри Мейне («Petty Geophysical») – человеке, который разработал метод ОГТ. Его идея, в конечном счете, изменила способы получения и обработки сейсмических данных. Со

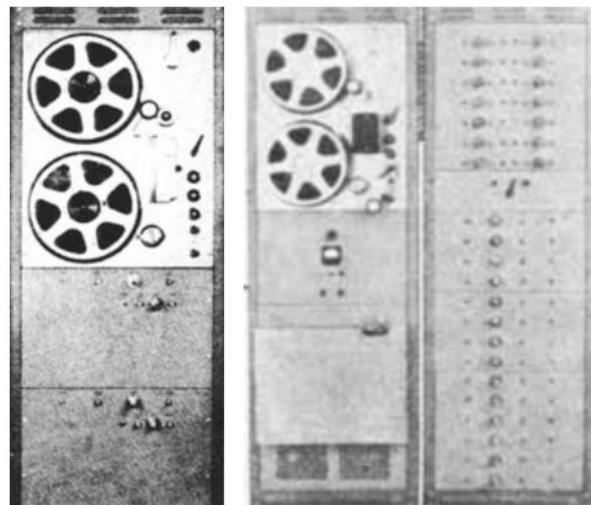
времен изобретения электромагнитного сейсмографа это была вторая научно-техническая революция в сейсморазведке. В полной мере метод ОГТ раскроет себя после появления цифровой записи, телеметрии и 3D съемок.

Аналоговая запись на магнитную ленту

В начале 50-х годов в США вместо прямой осциллографической записи на фотобумагу появился способ прямой аналоговой записи на ленту с высокочастотным подмагничиванием, т.е. магнитная аналоговая запись. Это давало возможность воспроизведения записанной информации. При появлении записи на магнитную ленту в сейсмостанциях, помимо устройства записи, появилось устройство воспроизведения, где можно было производить накопления, применять различные фильтры и регулировки, что существенно повысило возможности сейсморазведки. Магнитная лента имела динамический диапазон около 40–45 дБ. [17].

В 1953 г. компания «Ampex Electronic Corporation» представила первую сейсмическую станцию Ampex 306 data

▼ Рис. 12. Слева – Ampex 306 data recorder (1953 г.), Справа – Ampex 306-14 magnetic tape recorder (1954 г.) [18].





▲ Рис. 13. Сейсмостанция «SIE» MR-12 (24 канала).

recorder с записью на магнитную ленту (Рис. 12). Её успех подхватили другие производители геофизических приборов. В 1954 г. компания «SIE» следом за «Амрех» выпустила серию сейсмических станций MR (magnetic recorder), начиная с MR-4. На рисунке 13 представлена 24-канальная сейсмостанция «SIE» MR-12.

Наряду с «Texas Instruments» «Dresser-SIE» (Southwestern Industrial Engineering Company) являлась одним из лидеров в приборостроении того времени; фирма изготавливала большую номенклатуру различного оборудования: элементы приборов, геофоны, усилители для сейсмостанций и сейсмостанции, осцил-

лографы и т.д. «SIE» одна из первых выпустила компактные геофоны.

В СССР система с промежуточной магнитной записью появилась в 1957 г. под индексом ССМ-57 [13,19]. Дальнейшие ее усовершенствования под руководством А.И. Слуцкого («ВНИИГеофизика») привели к созданию таких моделей как СС-24-61М, СМП-24/СМОВ-24, Поиск-1-48 (Рис. 14).

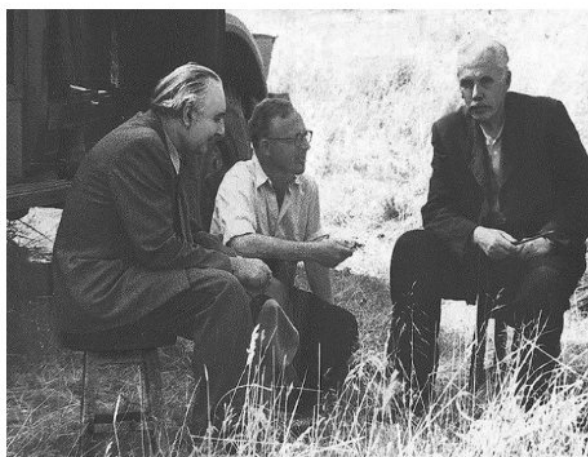
Производство отечественных сейсморазведочных станций также было организовано и на предприятии «СКБ СП» (Специальное конструкторское бюро сейсмического приборостроения, г. Саратов). В 60-е и 70-е годы было выпущено несколько моделей 24 и 48 канальных сейсмостанций с магнитной записью: СМ-24, СМ-48, СС-24-61М, СС-24МН, СС-48М, СС-48МН, СМП-24, а также машины для обработки сейсмоданных (ПСЗ-1, ПСЗ-2, ПСЗ-2М, ПСЗ-4, МС-1, МС-2), которые позволяли вводить кинематические поправки в произведенную запись и осуществлять простые операции по обработке, а также ряд фотопостроителей (ФБ-1, ФБ-2, ФБ-3, ФБ-4, ФБШД) [21].

Цифровая запись на магнитную ленту

Следующим шагом в развитии систем регистрации стало внедрение аналого-цифровых преобразователей (АЦП или ПАК) в модуле записи информации. То есть оцифровка сейсмограмм происходила до записи на магнитную ленту. Это позволило существенно расширить динамический диапазон, и в итоге повысить качество и скорость обработки. Появление такого вида записи дало возможность в полной мере реализовать метод ОГТ.

Внедрение цифровой технологии в начале 60-х годов резко изменило характер сейсмического приборостроения. В 1961 г. компания «GSI» вместе с «Texas

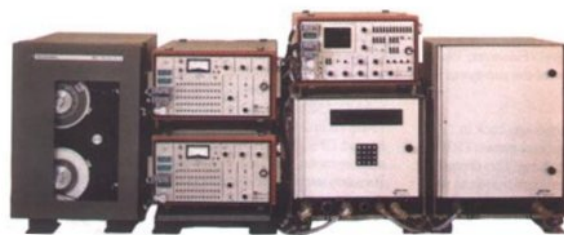
▼ Рис. 14. Г.А. Гамбурцев, А.И. Слуцкий и В.С. Воюцкий. Наро-Фоминский полигон ВНИИГеофизики, 1954 г. [20].



Instruments» (на тот момент пока ещё дочерняя компания «GSI»), при поддержке «Техасо» и «Mobil» начала разработку цифровой технологии записи сейсмических данных на магнитную ленту. В 1963 г. была осуществлена первая цифровая запись. Так появилась цифровая сейсмостанция DFS-I (24 канала с частотой дискретизации 1, 2 или 4 мс) [22].

В 1968 г. компания «Texas Instruments» («TI») представила новую модель цифровой сейсмической станции – DFS III (третье поколение). В отличие от предыдущих поколений станций DFS это была первая станция данной фирмы с интегрированными чипами АЦП; пропускная способность была увеличена до 48 каналов и имела более высокий динамический диапазон – до 84 дБ. В конце 1970 г. «Texas Instruments» выпустила модернизированную станцию – DFS IV, а в 1975 – DFS V – настоящий бестселлер своего времени (продано 1000 комплектов за 6 лет) и отраслевой стандарт на многие годы (Рис. 15). В том числе благодаря тому, что в DFS IV и DFS V была решена проблема надежного и скоростного магнитофона. 120-канальная станция DFS пятого поколения была значительно компактнее предшественников, что давало возможность работы в труднодоступных условиях. Вообще применение интегральных микросхем CMOS/VLSI и многослойной печати резко уменьшили размер модулей [23]. Кроме того была разработана первая компьютеризированная сейсмостанция CFS-I. Она обеспечивала оперативное управление системами DFS, производила операции с сейсмическими данными до записи на магнитную ленту, в том числе вертикальное суммирование по различным алгоритмам и корреляцию виброграмм.

Компания «Sercel» («CGG») всегда была одним из лидеров отрасли и спустя



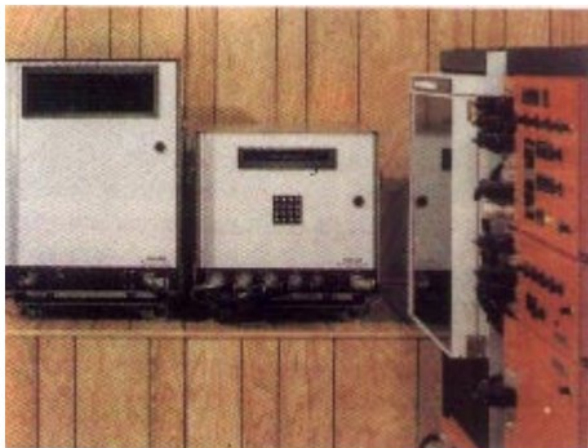
▲ Рис. 15. Цифровая сейсмостанция DFS-V [24].

некоторое время (в 1966 г.) представила свою первую цифровую систему SN662, а в 1968 – SN328 с пропускной способностью до 48 каналов. В 1971 г. компания выпустила очень удачную сейсмостанцию – SN338 с IFP усилителем, имеющую модульное расширение до 72 каналов (Рис. 16).



▲ Рис. 16. Цифровая сейсмостанция «Sercel» SN338. 1971 г. [25].

В 1973 г. на рынке сейсморазведочного оборудования появился новый производитель – «Geosource». Компания приобрела «Petty Geophysical Engineering Company» и «Mandrel Industries» (дочерняя компания «Amplex Corporation») с подразделением «Ray Geophysical». «Geosource» производила несколько удачных моделей цифровых сейсмостанций под маркой «MDS» (Mandrel Data System): MDS-8 (48 каналов), MDS-10 (96 каналов) с IFP (Рис. 17), MDS-14.



▲ Рис. 17. Цифровая сейсмостанция MDS-10 [24].

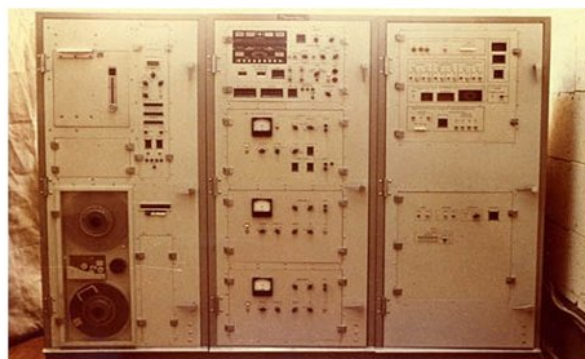
В СССР в конце 60-х была разработана первая собственная 24-канальная цифровая сейсмостанция ССЦ-1 (Станция Сейсмическая Цифровая). Ее созданием занимался коллектив инженеров «ВНИИГеофизики» во главе с Геннадием Михайловичем Борковским. ССЦ-1 не была предназначена для широкого использования на производстве, но послужила прототипом для следующей модели ССЦ-2 – первой серийно выпускаемой советской сейсмостанции (с 1970 г.). Первые полевые работы с сейсмостанцией ССЦ-2 были проведены в «Таймырской геофизической экспедиции» зимой 1972 года одновременно с внедрением методики ОГТ. Так началась эра цифровой сейсморазведки в нашей стране. Московским заводом «Геофизприбор» было выпущено более 200 сейсмических станций ССЦ-2, что позволило в кратчайшие сроки внедрить цифровую регистрацию в полевых проектах, создать предпосылки для разработки пакетов обработки цифровых данных и, что является исключительно важным, удалось подготовить отряд высококвалифицированных операторов цифровых станций, обслуживающих сложную аппаратуру. Это позволило быстро осво-

ить новый технологический уровень сейсморазведочных работ.

В 1972 г. «ВНИИГеофизика» совместно с фирмой «SERSEL» на основе SN-338 разработала сейсмостанцию ССЦ-3 (серийный выпуск с 1974 г.), а в 1976 г. – ССЦ-4. Кроме того, в 70-е годы был также разработан и испытан опытный образец компьютеризированной станции «Горизонт», однако до серийного выпуска дело не дошло.

В 1975 г. в «СКБ СП» под руководством Б.Л. Лернера последовательно выпускаются четыре модификации станций «Волжанка». Немногом позже (в 1978 г.) на базе переработанной «Волжанки» начался выпуск цифровых 48-канальных станций «Прогресс-1», «Прогресс-2» (Рис. 18) и «Прогресс-3». Цифровая 96-канальная сейсмическая станция «Прогресс-96» имела компьютеризированную систему диагностики и контроля полевого оборудования. С появлением «Прогресс-96В» в 1988 г. началось массовое внедрение вибрационной сейсморазведки благодаря коррелятору, встроенному в цифровую станцию. Данная модификация стала наиболее распространенной в СССР. На основе данных, полученных с помощью этой станции, были открыты многие месторождения в Западной Сибири и других регионах нашей страны.

▼ Рис. 18. Сейсмостанция «Прогресс-2» («СКБ СП») [21].



Телеметрия

В предыдущих поколениях регистрирующих систем сигнал на сеймостанцию приходил в аналоговом виде и только внутри системы преобразовывался в двоичный код. Кроме того, у таких станций имелся ряд ограничений: не более 128 каналов, длина линии передачи данных не более 3 км из-за искажения сигнала (наводки, взаимное влияние проводов). Недостатком таких сеймостанции являлась передача данных только лишь с одной приемной линии. Это исключало проведение 3D сейморазведочных работ. Но геологоразведочной индустрии требовалось получение более информативных и качественных сейсмических данных. Телеметрическим системам удалось избавиться от этих недостатков.

Оцифровка сигнала производилась в полевых модулях сбора информации, находящихся в непосредственной близости к сеймоприемникам, что позволило повысить пропускную способность, уменьшить количество пар проводов, и как следствие – установить детальный контроль качества полевого оборудования.

Появление телеметрических систем сбора данных привело к взрывному росту количества каналов, используемых при проведении сейморазведочных работ, и ознаменовало начало эпохи 3D сейморазведки (несмотря на то, что первые экспериментальные 3D работы были проведены компанией Exxon еще в 1967 г.).

Сеймостанция GUS-BUS с напольными модулями сбора информации CDX – первая в мире цифровая телеметрическая станция – была выпущена в 1976 г. компанией «Globe Universal Science Manufacturing». Максимальная пропус-

кая способность GUS-BUS (Рис. 19) на момент выпуска была заявлена в 1344 канала, а 80-е годы компания выпустила систему на 10 000 каналов. Компания «GUS Manufacturing» и ее президент Джей Миллер (Jay W. Miller) внесли весомый вклад в развитие сейсмической телеметрии и новых методов сбора данных для удовлетворения потребностей отрасли. Многие разработки компании опередили свое время [26].

▼ Рис. 19. Телеметрическая станция GUS-BUS System 2 [6].



В 1977 г. компания «Sercel» выпустила свою первую телеметрическую станцию SN348 с пропускной способностью в 240 каналов с дискретом 2 мс (Рис. 20). Однако у нее имелась только одна телеметрическая линия, что ограничивало использование большого количества каналов.

▼ Рис. 20. Телеметрическая станция «Sercel» SN348 [25].



В 80-е годы телеметрические системы активно развивались в направлении уменьшения веса сейсмических кабелей, ослабления индуктивных наводок, минимизации пути передачи аналоговых данных и общего улучшения электроники управления. В 1985 г. компания «Sercel» выпустила 240-канальную (2 мс) телеметрическую станцию SN368 с возможностью подключения к центральной станции дополнительных периферийных полевых телеметрических модулей, что позволяло увеличивать количество каналов до 1200.

Компания «Geosource» производила телеметрические системы MDS-16 (1016 каналов) и MDS-18, модификации которых с 1988 г. по 1994 г. выпускала «HGS» («Halliburton Geophysical Services»). «HGS» образована в 1988 г. путем покупки «GSI» (дочерняя компания «Texas Instruments») и «Geosource» Inc. компанией «Halliburton». Кстати, компания «GSI» ещё до продажи в «Halliburton» выпустила свою последнюю модель – телеметрическую цифровую станцию DFS-VII (480 каналов). Неадекватный менеджмент привел производство оборудования «HGS» в упадок, из-за чего в 1994 г. компания была продана в «Western Atlas».

В 1988 г. в области производства телеметрических станций происходит настоящий прорыв. Малоизвестная компания «Input/Output» (I/O) представляет свою первую одноименную телеметрическую систему – Input/Output System One. А уже в 1991 г. компания выпускает новую систему Input/Output System TWO (Рис. 21), реализовав в ней самые передовые технологии, включая новейшую 24-битную систему преобразования аналоговых данных в цифровые (дельта-сигма модуляция) [27]. Это

значительно расширило динамический диапазон, и соответственно повысило точность и качество регистрируемых сейсмических данных. Качество данных, удобство работы и возможность регистрации более 8000 активных каналов сделали эту станцию бестселлером своего времени, а компанию «Input/Output» вывели на лидирующие позиции по продаже сейсмического оборудования. К 1993 г. «Input/Output» занимала долю рынка по продажам сейсмического оборудования больше 50%, в то время как «Sercel» (главный конкурент) – около 40% [28].



▲ Рис. 21. Центральный сейсмический модуль телеметрической сейсмической системы I/O SYSTEM TWO [29].

Через два года «Sercel» выпускает конкурента, одну из самых популярных сейсмостанций за всю историю – телеметрическую станцию SN388 также с 24-битным преобразователем (Рис. 22).

После провальных лет второй полови-

▼ Рис. 22. Модули SN388. 1993 г. [25].



ны 90-х для «I/O» у «Sercel» практически не остается серьезных конкурентов, но, тем не менее, компания продолжает совершенствовать сейсморазведочное оборудование, включая системы регистрации. В 1999 г. «Sercel» выпускает 408UL, в 2005 – 428XL, в 2013 – 508XT с возможностью регистрации практически неограниченного количества каналов при интеграции бескабельных систем.

Компания «I/O» только в 2002 г. выпустила обновленную систему I/O SYSTEM FOUR, но былой любви пользователей снискать не удалось, как, впрочем, и станции G3I HD (>120000 каналов), сконструированной на основе разработок компании «GX Technology» и выпущенной уже под брендом «ION».

Что же касается Советского Союза и России, то в нашей стране разработки телеметрических систем велись с середины 80-х годов, но перестроечный период и либеральные реформы 90-х годов привели к упадку отечественного приборостроения. Тем не менее, в 1994 г. СКБ СП была выпущена телеметрическая станция «ПРОГРЕСС-Т», а в 2002 – «ПРОГРЕСС-Т2», но серьезную конкуренцию лидерам рынка они составить не смогли. Только в 2009 г. СКБ СП удалось создать продукт, позволяющий в какой-то мере конкурировать с западными производителями – «ПРОГРЕСС-Т3» (26400 каналов при периоде квантования 2 мс).

Бескабельные системы

На смену телеметрическим системам постепенно приходят бескабельные системы.

Эволюция систем регистрации в этом направлении весьма закономерна, поскольку неограниченный рост количества каналов ведет к увеличению численности персонала, к десяткам или

даже сотням километров кабелей и их обслуживанию, к огромному количеству напольных модулей и т.д. В конечном счете, это существенно снижает рентабельность сейсморазведочных работ. Компоновка бескабельных систем, напротив, проста и удобна: сейсмоприемник, который может использоваться отдельно или интегрироваться в телеметрическую систему, АЦП, микропроцессоры, гигабайты памяти, GPS – и все это в одном небольшом блоке.

Бескабельные системы можно разделить на два вида: автономные («слепые») и беспроводные системы контроля качества в режиме реального времени. Автономные системы не имеют возможности передачи информации, например, об уровне микросейсм и заряда батареи, а сбор данных происходит уже на базе партии. Отсутствие контроля может привести к потере информации: «Нет ничего дороже, чем отсутствие данных после выполнения всей работы» (Г. Мэйн). Подобных недостатков лишены беспроводные системы регистрации в режиме реального времени.

Первое упоминание бескабельных систем относится еще к 1941 г., когда был получен патент США на способ передачи сейсмических данных по радиоканалу. Однако только в 70-х годах благодаря техническому прогрессу удалось создать массовые образцы бескабельных систем сбора данных: Telseis от фирмы «Aquatronics» (в 1976 г. куплена компанией «Fairfield»), OpSeis 5500 компании «Applied Automation» (куплена «CGG»), Myriaseis («CGG»/«IFP»), Digiseis от «Terra-Marine» (куплена в 1991 г. компанией «Geco-Prakla»). В основном бескабельные системы имели вспомогательную функцию и использовались для регистрации сейсмических данных в

транзитных зонах. Они характеризовались малым временем автономной работы (до 72 часов), большим весом (до 20 кг) и длительным временем передачи данных. Последнее сильно тормозило развитие бескабельных систем.

Компания «GUS Manufacturing» выпустила автономную бескабельную систему регистрации SGR (1979 г.) без «real-time», с записью в самом «ноде» с последующей выгрузкой в обрабатывающую систему, что позволило уменьшить вес системы до пригодных для эксплуатации размеров. Синхронизация записи происходила по радиоканалу [30]. В 1982 г. компания «GUS Manufacturing» выпустила SGR-II с возможностью записи более 10 000 каналов (Рис. 23) [18]. Как и в случае с телеметрией разработка опередила свое время.

Однако невозможность оперативного контроля автономных систем усложняла работу, поэтому развитие бескабельных систем было направлено на контроль системы и передачу данных в реальном времени: BOX («Fairfield»), Eagle/SU6-R («Sercel»), PolySeis («Syntron»).

▼ Рис. 23. Автономные бескабельные системы регистрации SGR-II («GUS», 1982) [18].



«I/O» в 1995 г. выпустила систему RSR (Remote Seismic Recorder) с записью информации на флэш-память и многоканальной системой радиосвязи. Спустя десять лет, в 2005 г. компания «Ascend Geo» выпустила систему G5, а затем Ultra G5 с непрерывной записью, синхронизированной с центральным блоком сейсмостанции. Подобные системы выпускали и «I/O» (FireFly, 2006 г.); также «VibTech»/«Sercel» выпустили систему Unite с контролем и передачей данных по WiFi. Обе бескабельные системы имеют возможность интеграции в кабельные системы сбора данных собственного производства, что дает возможность использования неограниченного числа каналов в режиме реального времени.

После внедрения технологии позиционирования (GPS) в модули бескабельных систем отпала необходимость синхронизации отдельных «нодов» по радиоканалу, что позволило создать бескабельные системы нового поколения различных конфигураций с возможностью автономной записи в режиме реального времени – по Wi-Fi, по частотам сотовой связи, а также через телеметрический кабель [30].

Появились такие системы как GSR («Geospace», 2007), ZLand («Fairfield», 2008), Hawk («Inova», 2011), Sigma («iSeis»/«Seismic Source», 2010). «Wireless Seismic» в 2010 г. создала новую бескабельную систему, передающую данные в режиме реального времени – RT1000, в 2012 – систему RT2, в 2017 – RT3. Стоит отметить, что производители придерживаются разных концепций архитектуры бескабельной системы – это либо система с внешним подключением аккумулятора и сейсмоприемника, либо система «все в одном», как у «Fairfield». Системы имеют разные способы установ-

ки сейсмоприемника: стандартный и заглубление в отверстие, сделанное специальным приспособлением, что несколько усложняет установку, но компенсируется улучшенными характеристиками приема сигнала. Также бескабельные системы различаются способами зарядки аккумуляторов и способами передачи данных.

В последние годы бескабельные системы пополнились новыми моделями различных производителей (Рис. 24–30): GSX и GCL («Geospace», США), Sigma4 («iSeis»/ «Seismic Source», США), WTU-508 и WiNG («Sercel», Франция), Hawk HD («INOVA», КНР/США), Tremornet/Quantum («Innoseis»/ «INOVA», Голландия/КНР/США), NuSeis и NRU 1C («GTI», КНР), Smart Solo («Dynamic Technologies», КНР) и проч. В «СКБ СП» (Саратов) создана отечественная бескабельная автономная система регистрации «SCOUT», с помощью которой выполнен ряд производственных проектов. Дальнейшее совершенствование станции в настоящее время продолжается («SCOUT HT»).

В целом тенденция развития бескабельных систем заключается в увеличении времени автономной работы и уменьшении веса устройств, снижении стоимости и уменьшении искажений, а также в улучшении способов передачи данных и QC.

▼ Рис. 24. Бескабельная система Hawk («INOVA») [31].



▲ Рис. 25. Бескабельные системы WTU-508 (слева) и WiNG (справа) производства «Sercel» [25].



▲ Рис. 26. Бескабельная система GSR/GSX («Geospace») [32].



▲ Рис. 27. Бескабельная система Sigma («iSeis/Seismic Source») [33].



▲ Рис. 28. Бескабельные системы RT2 и RT3 («Wireless Seismic») [34].



▲ Рис. 29. Бескабельная система SCOUT («СКБ СП») [21].



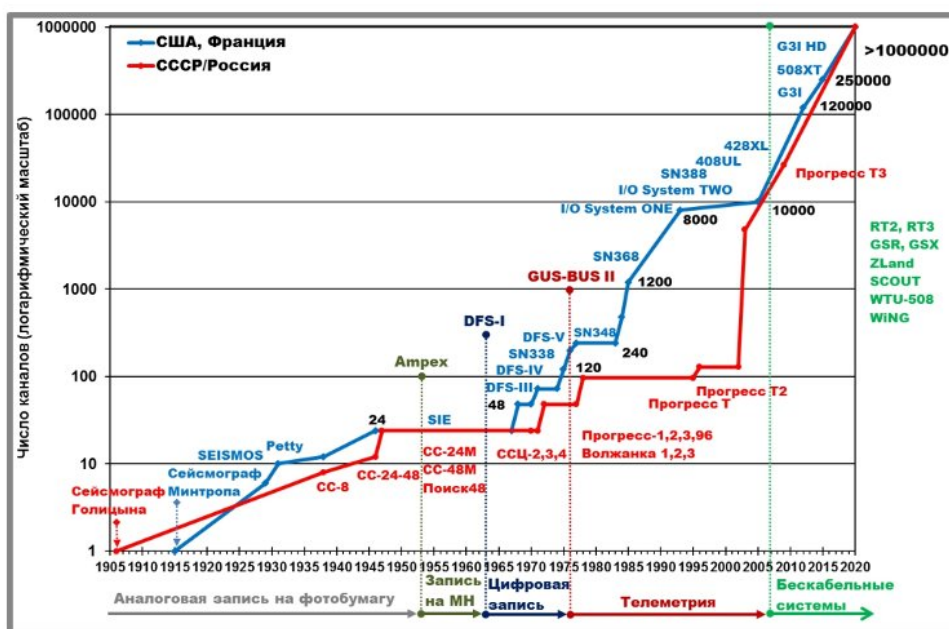
▲ Рис. 30. Бескабельная система Zland («FairfieldNodal») [35].

Маловероятно, что в ближайшие годы бескабельные системы смогут полностью заменить кабельную телеметрию; как и 40 лет назад – это небольшие проекты и гибридизация с телеметрией в труднодоступных местах. Однако умень-

шение стоимости оборудования и упрощение процесса сбора данных со временем позволит вытеснить кабельные системы точно так же, как метод Вибро-сейс существенно потеснил взрывной тип возбуждения сейсмических волн.

Графики роста количества каналов за последние 100 лет (Рис. 31) от простейших механических сейсмографов до цифровых систем с практически бесконечной пропускной способностью показывают огромный прогресс методики, технологии и технических средств проведения сейсморазведочных работ.

За прошедшее столетие сейсморазведка сделала колоссальный научно-технический скачок. Эволюция средств регистрации сейсмических сигналов от простых одноканальных механических сейсмографов до десятков и сотен тысяч каналов телеметрических и бескабельных систем наряду с внедрением площадных методик позволила решать труднейшие геологические задачи на высоком техническом и технологическом уровне. Парадоксально, но усложнение технических средств регистрации привело к их упрощению – бескабельным (нодальным) системам.



◀ Рис. 31. Рост «канальности» сейсморегирующего оборудования в России и за рубежом.

Литература:

1. Science Museum Group
<https://www.sciencemuseumgroup.org.uk> (дата обращения 07.05.2020);
2. Короновский Н.В. Земля. Метеориты, вулканы, землетрясения. Фрязино: Век 2, 2014. 172 с.;
3. Ильина Т.Д. История основных направлений разведочной геофизики в СССР: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук / Ин-т истории естествознания и техники Акад наук СССР. М., 1990;
4. Крылов А.Н. О работах Б.Б. Голицына по сейсмологии // Успехи физических наук. М., 1918. Т. 1, Вып. 2. С. 101–107;
5. Gregory Clancey. Earthquake Nation: The Cultural Politics of Japanese Seismicity, 1868–1930. Berkeley: University of California Press, 2006;
6. GSH Geoscience Center (Geoscience Center & Museum), 1790 W Sam Houston Pkwy N., Houston, TX 77043. http://geocenter.gshtx.net/pdf/GSH-Inventory_10-30-19.pdf (дата обращения 17.05.2020);
7. ФГБУК «Политехнический музей», Москва. <https://polymus.ru> (дата обращения 13.05.2020);
8. Mintrop Mechanical Seismograph and Recorder (GSH)
[https://wiki.seg.org/wiki/Mintrop_Mechanical_Seismograph_and_Recorder_\(GSH\)](https://wiki.seg.org/wiki/Mintrop_Mechanical_Seismograph_and_Recorder_(GSH)) (дата обращения 29.04.2020);
9. Ludger Mintrop
https://wiki.seg.org/wiki/Ludger_Mintrop (дата обращения 29.04.2020);
10. Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморастведка. Том 1. История, теория и получение данных. М.: МИР, 1987. 447 с.;
11. Ильина Т.Д. Формирование советской школы разведочной геофизики (1917–1941 гг.). М.: Наука, 1983. 216 с.;
12. Богданов А.И., Рябкин Л.А. Развитие нефтегазовой полевой геофизики в СССР // Геология нефти и газа. 1982. №11;
13. Ветераны: из истории развития нефтяной и газовой промышленности. М.: Нефтяное хозяйство, 2008. Вып. 21. 256 с.;
14. Караев Н.А. Становление и пути развития сейсморастведки нетрадиционных моделей верхней части коры и возможности современных сейсмоакустических технологий в руднопоисковых провинциях // Технологии сейсморастведки. 2017. №4. С. 5–36;
15. Резяпов Г.И. Сейсморастведка: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 309 с.;
16. Осциллограф сейсмический ОС-60 <https://goskatalog.ru/portal/#/collections?id=7328244> (дата обращения 13.05.2020);
17. William (Bill) H. Dragoset. A historical reflection on reflections // The Leading edge. Society of Exploration Geophysicists, 2005;
18. Robert E. Sheriff. History of geophysical technology through advertisements in Geophysics // Geophysics, 1985. Vol. 50, №12. P. 2299–2408;
19. Сейсморастведочная станция с промежуточной магнитной записью ССМ-57. Завод "Нефтеприбор". Министерство геологии и охраны недр СССР. Особое конструкторское бюро / Каталог геофизической аппаратуры. Л.: Гостоптехиздат, 1961. 3 с.;
20. Гамбурцев А.Г. Жизнь в науке: к 110-летию со дня рождения академика Г.А. Гамбурцева (1903-1955) // Пространство и время, 2013. № 1 (11). С. 199–212;
21. АО «Специальное конструкторское бюро сейсмического приборостроения» <http://skbsp.ru> (дата обращения 02.05.2020);
22. Bob A. Hardage, Marion Bone. Robert J. (Bob) Graebner // The Leading edge. Society of Exploration Geophysicists, Memorials, 2019;

23. Roger Parkinson. High Resolution Site Surveys. London and New York: Spon Press, Taylor & Francis Group, 2001;

24. History of Seismic Prospecting In ONGC - A Chronological Sketch of Events N.C. Sharma Group General Manager (E), Oil and Natural Gas Corporation Limited. https://www.spgindia.org/geohorizon/jan2002/2002jan_n_c_sharma.PDF (дата обращения 10.05.2020);

25. Sercel <https://www.sercel.com> (дата обращения 10.05.2020);

26. Jay Miller https://wiki.seg.org/wiki/Jay_Miller (дата обращения 08.05.2020);

27. Norman M. Cooper. Seismic Instruments – What's New? ... And What's True? // Canadian Society of Exploration Geophysicists (CSEG),

<https://csegrecorder.com/articles/view/seismic-instruments-whats-new-and-whats-true> (дата обращения 15.05.2020);

28. Input/Output, Inc. Company Profile, Information, Business Description, History, Background Information on Input/Output, Inc.

<https://www.referenceforbusiness.com/history2/34/Input-Output-Inc.html#ixzz6NCuwVPPG> (дата обращения 04.05.2020);

29. Центральный сейсмический модуль телеметрической сейсмической системы I/O SYSTEM TWO. System Control Module – SCM

<https://goskatalog.ru/portal/#/collections?id=16319950> (дата обращения 11.05.2020);

30. Tim Dean, John Tulett, Richard Barnwell. Nodal land seismic acquisition: The next generation // First Break. February 2018;

31. INOVA <http://www.inovageo.com> (дата обращения 15.05.2020);

32. Geospace Technologies <https://www.geospace.com> (дата обращения 14.05.2020);

33. SeismicSource

<http://seismicsource.com> (дата обращения 17.05.2020);

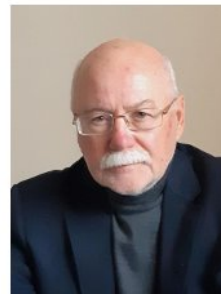
34. Wireless Seismic

<https://wirelessseismic.com/> (дата обращения 16.05.2020);

35. Fairfield Geotechnologies

<http://fairfieldgeo.com> (дата обращения 15.05.2020).

Подробнее об авторах



Жуков
Александр Петрович

Генеральный директор
ООО «Геофизические
Системы Данных»,
д.т.н.



Горбунов
Виктор Сергеевич

Геофизик ООО
«Геофизические
Системы Данных».