

# Возможности вибрационной сейсморазведки в повышении эффективности инженерных изысканий

■ Жуков А.П., Коротков И.П., Соловьев А.О., ООО "НПП "Спецгеофизика", г. Москва.

■ Кузнецов В.М., Серебряков В.С., РУДН, г. Москва.

## Введение

Часто при обсуждении со специалистами по инженерной сейсморазведке возможностей применения вибрационных сейсмоисточников в инженерных изысканиях приходится слышать от них вопрос: «А зачем? У нас есть кувалда — дешевый и хорошо зарекомендовавший себя инструмент. А ваши виброисточники тяжелые и дорогие, требуют специально подготовленных кадров»

В данной статье мы постараемся дать ответ на вопросы «Зачем?» и «Чем?», а также поделимся результатами, полученными нами в инженерных изысканиях с помощью нашего варианта вибрационного источника для многоволновой малоглубинной сейсморазведки.

## «Зачем?»

Ответ на этот вопрос лежит в плоскости возможностей управления параметрами зондирующего сигнала. Особенно это важно при изысканиях в областях с осложненными геологическими условиями (например, оползневые или карстовые области). Традиционно используемая в инженерных изысканиях кувалда не дает возможности управления параметрами зондирующего импульса (частотный спектр сигнала и его фазовые характеристики). Также кувалда имеет достаточно высокий разброс амплитуды импульса даже в процессе выполнения накоплений на одном пункте возбуждения из-за накопления усталости «молотобойца». Также использование человека в качестве «привода» кувалды накладывает определенные ограничения на работы в сложных погодных условиях.

Механизированные импульсные источники типа «Геотон» лишены части из указанных недостатков. В частности они позволяют обеспечить хорошую повторяемость амплитуды сигнала и её регулирование в ограниченных пределах. Но как правило такие источники неспособны генерировать наиболее востребованные в инженерной сейсморазведке поперечные волны.

Источники типа «сейсмическое ружье», электроискровые источники и пневмопушки мы не рассматриваем в силу их экзотичности для сухопутной инженерной сейсморазведки.

Наиболее полными возможностями в управлении характеристиками зондирующего сигнала обладают именно вибрационные источники, которые помимо амплитуды позволяют управлять частотным диапазоном и фазовыми характеристиками сигнала, а также в реальном масштабе времени корректировать их в зависимости от условий возбуждения (в том числе характеристик контакта «плита-грунт»), что позволяет повысить точность и релевантность получаемого сейсмического разреза.

Кроме того виброисточники позволяют в разы повысить производительность работ, что особенно важно при проведении инженерных изысканий на протяженных линейных объектах (дороги, трубопроводы и т. д.), а также внедрять трехмерную сейсморазведку на больших площадках, например, в зонах распространения вечной мерзлоты, где требуется картирование кровли ММП и мониторинг состояния ММП.

И тут сразу возникает второй вопрос:

### «Чем?»

Очевидно, что использование классических виброисточников с гидравлическим приводом в инженерных изысканиях подобен стрельбе из пушки по воробьям. Такие виброисточники имеют явно избыточную мощность, а также являются слишком дорогими, тяжелыми и неповоротливыми для применения на стройплощадках. Даже появление в последнее время так называемых «легких» виброисточников не решает проблемы, т.к. их стоимость всё равно непомерно высока, а сами источники требуют для своего обслуживания привлечения высококвалифицированного персонала, имеющего допуск для работы на устройствах с высоким давлением. Также подобные виброисточники не предназначены для возбуждения поперечных волн.

Следовательно, для массового внедрения вибрационной сейсморазведки в инженерные изыскания по методике МОВ ОГТ требуется наличие недорогого компактного и легкого многоволнового виброисточника. Решить проблему получилось с помощью виброисточников, построенных на электроприводе. В частности, сотрудники Института нефтегазовой геологии имени Трофимука совместно со студентами геологического факультета Новосибирского государственного университета, разработали и изготовили работающий макет виброисточника на базе сабвуферов для кинотеатров полного погружения (так называемые 5D кинотеатры). О результатах своей работы они доложили на конференции «Инженерная сейсморазведка» в октябре 2023 года [3]. Полученная с помощью данного виброисточника глубинность в 100 метров считается достаточной для проведения инженерных изысканий. Однако, как отметили

сами разработчики, пока непонятно, как поведет себя виброисточник в зимнее время, т.к. неизвестны температурные характеристики используемой в сабвуфере демпфирующей жидкости. Кроме того из-за герметичной конструкции сабвуфера невозможно снять характеристику движения реактивной массы для организации обратной связи и расчета реальной силы воздействия на грунт, что важно в вибрационной сейсморазведке. Впрочем, работы над данным типом виброисточника продолжаются.

Ещё один из вариантов виброисточника был реализован специалистами ООО «НПП «Спецгеофизика» в содружестве с Лабораторией вибрационной многоволновой сейсморазведки Российского университета дружбы народов в период с 2018 по 2023 год в рамках разработки системы VIBROPS [1]. Информация об этом была опубликована [2] и неоднократно докладывалась на профильных конференциях («Инженерная и рудная геофизика», «Инженерная сейсморазведка», «Геофест», «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в РФ»). Более детальную информацию об этом виброисточнике изложим в следующем разделе.

### Малый электромеханический виброисточник

Малый электромеханический виброисточник, входящий в состав системы многоволновой вибрационной сейсморазведки VIBROPS создан на базе виброузла Lightning производства нидерландской компании Seismic Mechatronics. Вся система детально описана в публикации [2]. Здесь мы вкратце повторим характеристики самого виброузла. Он создан на основе линейного электродвигателя и промышленной системы позиционирования для станков с ЧПУ. Разработчики

|                                                                                                                   |                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Вес виброисточника                                                                                                | 90 кг                                   |
| Реактивная масса                                                                                                  | 50 кг                                   |
| Максимальная сила воздействия<br>В режиме возбуждения продольных волн Р<br>В режиме возбуждения поперечных волн S | 1200Н (270lbs)<br>1700Н (400lbs)        |
| Диапазон частот                                                                                                   | 1 – 1000 Гц                             |
| Диапазон частот работы источника с максимальной силой                                                             | 8 – 400 Гц                              |
| Длительность свип-сигнала                                                                                         | Теоретически не ограничена              |
| Тип свип-сигнала                                                                                                  | Моночастотный, ЛЧМ, пользовательский    |
| Источник питания                                                                                                  | Аккумулятор 48В                         |
| Время работы от одной зарядки                                                                                     | От 3 до 8 часов в зависимости от режима |

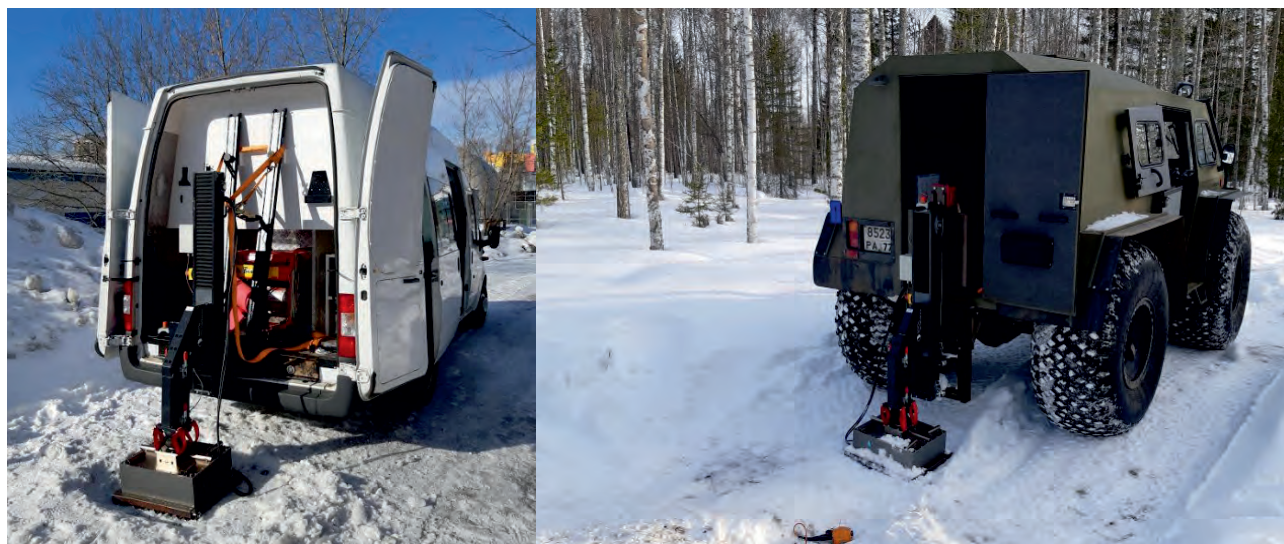
▲ Табл. 1. Основные технические характеристики виброузла «Lighting».

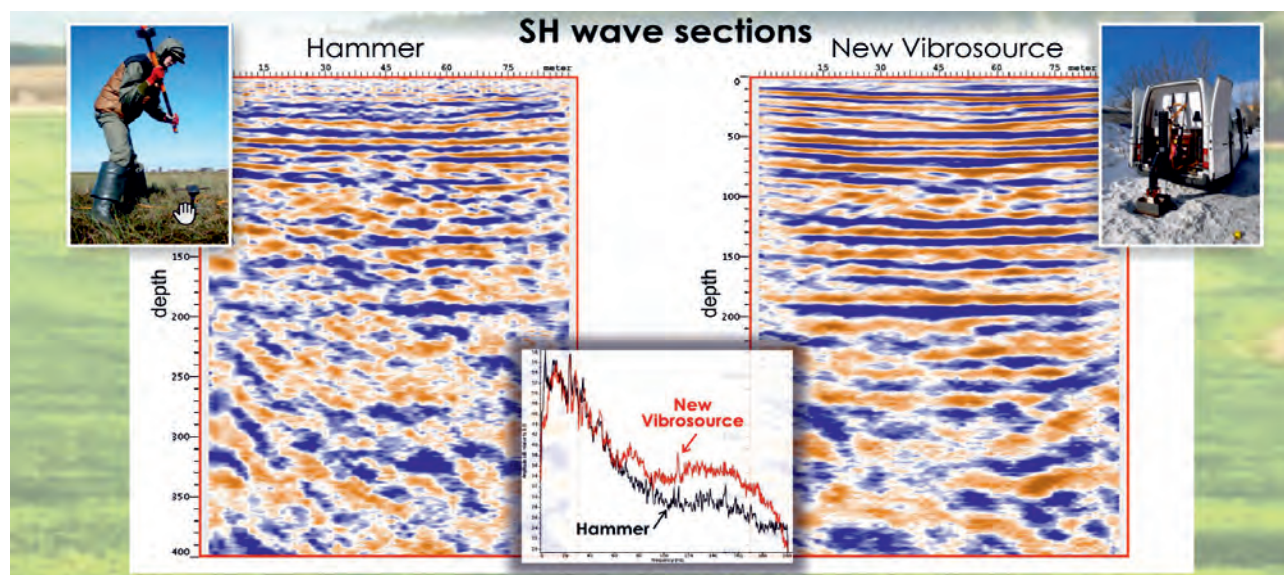
виброузла анонсировали его для проведения малоглубинных сейсмических работ для исследования ВЧР и инженерных изысканий до глубин 200 метров. В процессе проведенных испытаний выяснилось, что потенциал виброузла по глубинности на порядок выше (до 2 км), но в случае инженерных изысканий это, скорее, приятный бонус, чем необходимость. Основные характеристики виброузла указаны в таблице 1.

Система управления виброузла позволяет регистрировать пилот-сигнал, ускорение плиты и ускорение реактивной массы как в аналоговом, так и в цифровом формате. Само управление осуществляется с помощью ноутбука, подключенного к блоку управления по интерфейсу Ethernet.

Виброузел может устанавливаться на различные мобильные шасси (Рис. 1). Вопрос его сертификации (как и сертифи-

▼ Рис. 1. Виброузел Lightning, смонтированный на грузопассажирский фургон «Ford Transit» (слева) и на снегоболотоход «Лесник Профи» (справа).





▲ Рис. 2. Сравнение глубинного разреза, полученного с помощью кувалды (слева) и виброузла (справа).

кации самой вибросейсморазведки для инженерных изысканий) в госорганах оставим за рамками данной статьи.

В качестве регистрирующего комплекса может быть использована любая система, способная записывать виброграммы длиной от 20 до 60 секунд с частотой дискретизации до 0,25 мс. Исследования, описанные в данной статье, выполнялись с помощью бескабельной системы SCOUT (АО «СКБ СП», г.Саратов) в трехканальном исполнении и трехкомпонентных сейсмоприемников GS-3C, т.к. именно бескабельные системы наиболее удобны для размещения в зонах промышленной и гражданской застройки. Однако, виброузел при необходимости несложно синхронизировать и с кабельными системами, что подтвердилось при полевых испытаниях совместно с кабельной сеймостанцией Sercel 428.

Уже первые испытания виброузла, проведенные в 2019 году, и сравнение результатов его работы с традиционной кувалдой показали его преимущество, выразившееся в большей глубинности и детальности полученного результата. Объясняется это как большей энергетикой вибрационного сигнала, так и

большей амплитудой в области высоких частот (см. рис.2).

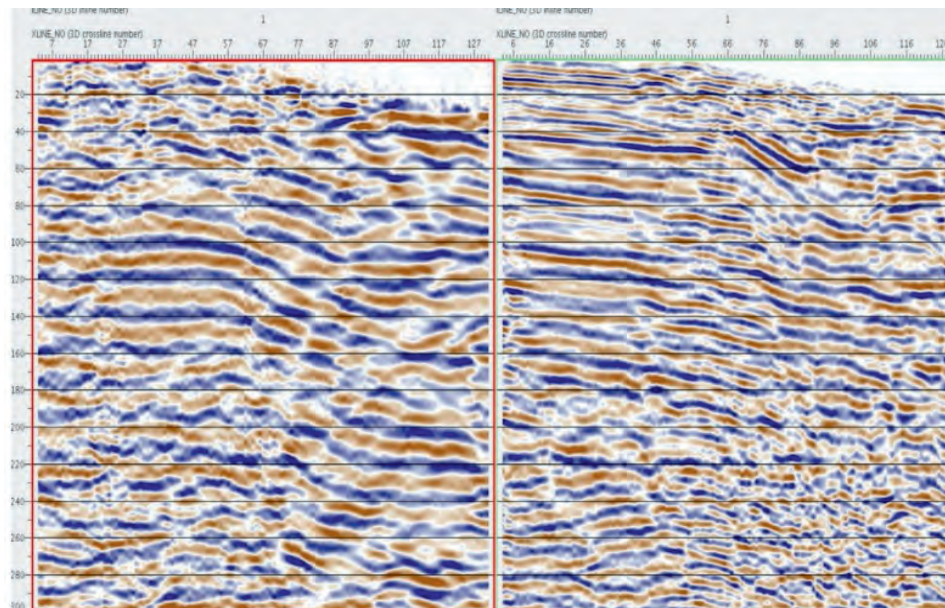
В дальнейшем были выполнены работы по инженерной сейсморазведке на двух объектах. Первым объектом являлся склон Воробьевых гор в г. Москва, который известен своими оползневыми процессами. Вторым объектом была зона карстовых проявлений на северо-западе г.Москва. Важный момент состоит в том, что все работы проводились в городе в условиях высокого уровня техногенных помех.

### Результаты работы в оползневой зоне

Задача состояла в выявлении оползневых блоков, глубины залегания зеркала скольжения и кровли стабильных слагающих пород. И хотя две последние задачи можно было решить с помощью бурения, решение первой задачи требовало выполнение непрерывного сейсмического профилирования. Результат проведенных в 2020 году работ показан на рис. 3.

Отчетливо видно, что сейсмический разрез, полученный с помощью продольных волн, не позволяет сделать никаких выводов о строении ВЧР ввиду его тонкослоистой структуры. Однако разрез,

► Рис. 3. Глубинный разрез, полученный в оползневой зоне Воробьевых гор (г. Москва). Слева – на продольных волнах, справа – на поперечных волнах.



полученный с помощью поперечных волн, дает гораздо более детальную картинку, которая позволяет опознать 4 оползневых блока, зеркало скольжения и кровлю устойчивых к оползню известняков. Полученные результаты хорошо коррелируются как с ранее проводимыми в этом районе исследованиями [4], так и с данными бурения, выполненного летом 2020 года.

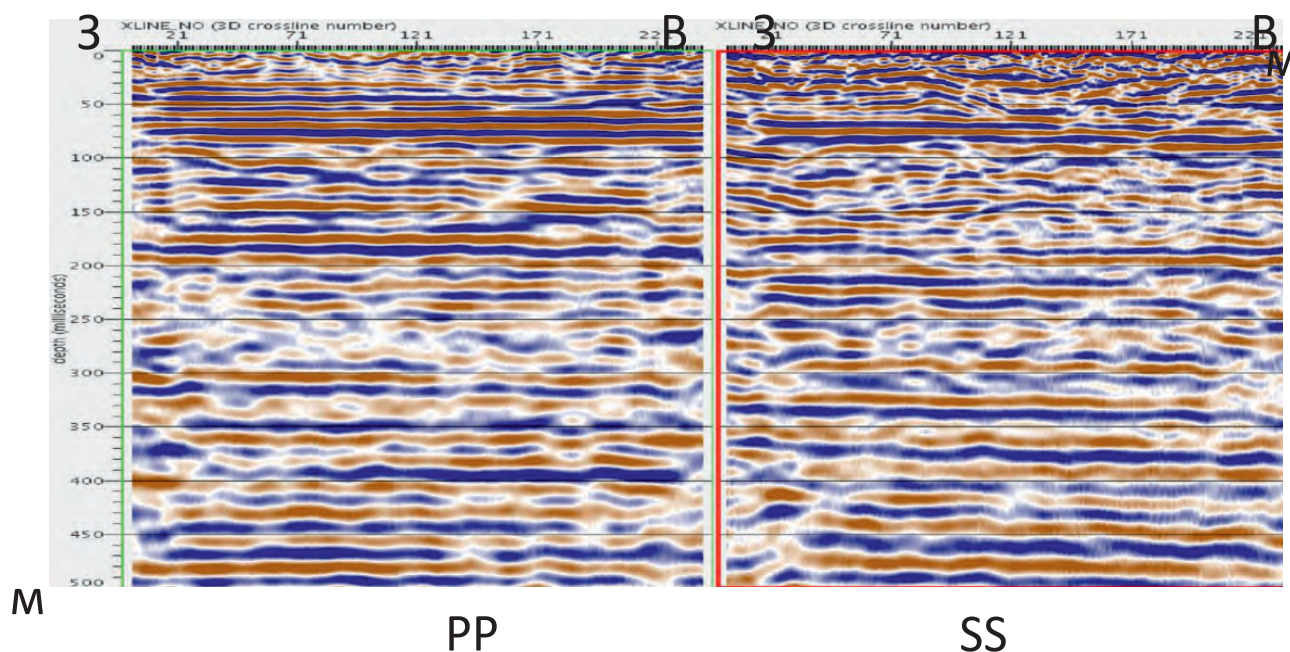
### Результаты работы в карстово-опасной зоне

Работы на северо-западе Москвы проводились в 2023 году в рамках исследования возможности обнаружения карстовых нарушений методом вибрационной сейсморазведки. В качестве объекта была выбрана одна из площадок, запроектированных под строительство станции на новой ветке московского метрополитена. Задачи, которые предстояло решить, представляли из себя определение мощности юрских глин и глубины залегания кровли карбона, а также выявление и локализация карстовых нарушений. Полученный глубинный разрез показан на Рис. 4.

Результаты интерпретации с привязкой к известной в районе работ литологии

показали, что на глубине 40 метров имеется водоносный горизонт ( $V_p=1500$  м/с), который хорошо виден на разрезе продольных волн и практически отсутствует на разрезе поперечных волн. Мощность юрских глин составляет не менее 20 метров, а кровля известняков располагается на глубине порядка 70-75 метров (Рис.5).

На первый взгляд в представленных разрезах ничего особенного не видно, кроме перемятости первых 20-30 метров, которую можно объяснить техногенными нарушениями (в данной зоне ранее велось активное строительство). Однако, при более детальном изучении водоносного горизонта на разрезе продольных волн можно обнаружить прогиб уровня грунтовых вод в районе 130-190 CDP. В этом же районе на разрезе поперечных волн можно заметить ухудшение прослеживаемости оси синфазности, соответствующей кровле известняков (особенно хорошо это заметно на рис.4, правая часть). Если исходить из выводов, приведенных в [5], то данные признаки позволяют с некоторой осторожностью сделать вывод о возможном наличии в данном районе начальных признаков возникновения суффозионной воронки. Подтверждением данного вывода может также служить заметный



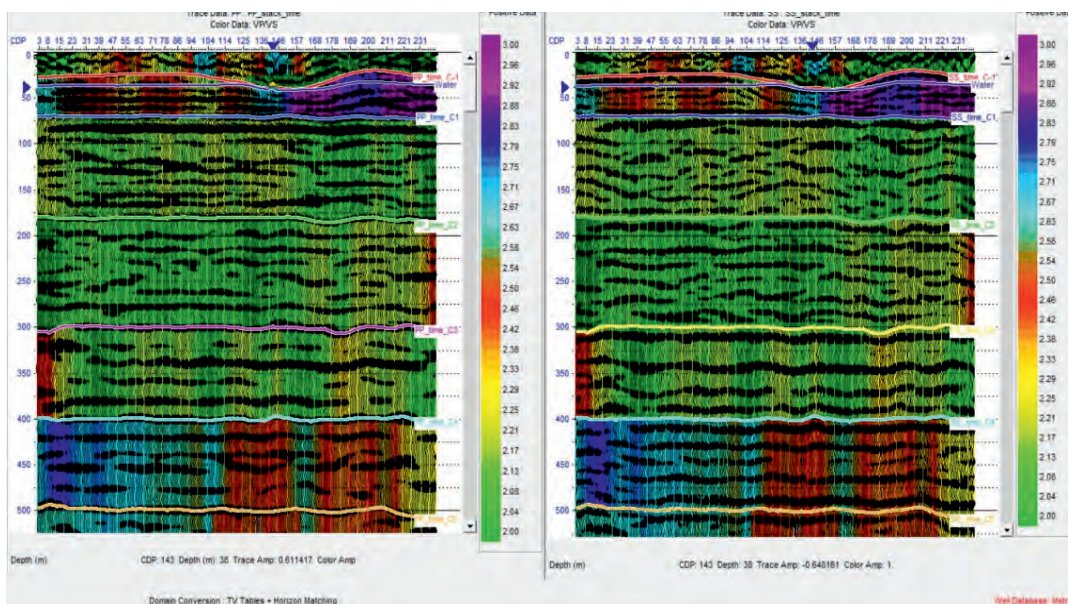
▲ Рис. 4. Глубинный разрез, полученный с помощью продольных (слева) и поперечных (справа) волн.

скачок соотношения  $V_p$  к  $V_s$  от 2,5 до 3,0, что говорит об изменении литологических характеристик юрских глин в этом месте. Однако для более точного определения требуется бурение скважины или выполнение 3D съемки методом МОВ ОГТ в месте предполагаемого карстового нарушения.

### Заключение

Проведенные работы показали, что вибрационная сейсморазведка, выполняе-

мая с помощью малого электромеханического виброисточника, вполне может применяться в инженерной сейсморазведке вместо традиционной кувалды. Особенно в районах со сложными приповерхностными геологическими условиями и в тяжелых погодных условиях. Получаемые результаты как правило превосходят по качеству, глубинности и детальности результаты, получаемые с помощью традиционных средств возбуждения сейсмического сигнала. Также преимуще-



◀ Рис. 5. Результат привязки литологии и соотношения  $V_p$  к  $V_s$ .

тво использования вибрационной сейсморазведки выражается в меньшей трудоемкости и потенциально более высокой производительности, т.к. для получения сопоставимого результата не требуется использовать накопления даже в условиях высокого уровня помех.

Однако используемый виброузел имеет ряд недостатков, главный из которых состоит в том, что компания Seismic Mechatronics отказалась от поставок этого оборудования в Россию из-за опасения попасть под санкции. Данный факт повышает актуальность разработки отечественного аналога. И данные работы уже ведутся, о чем говорилось в [3]. Также ведется разработка аналога виброузла Lightning с использованием российских комплектующих с целью устранения обнаруженных в нидерландском источнике конструкторских недоработок.

### Литература

1. Жуков А.П. и др. Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка элементов технологии изучения верхней части разреза (ВЧР) на основе применения мобильной сейсморазведочной системы и электроразведочной системы ускоренного электропрофилирования». РУДН, Москва, 2018, 2019 и 2020

2. Серебряков В.С., Жуков А.П., Соловьев А.О. Программно-аппаратный комплекс VIBROPS для малоглубинных исследований на основе электромеханического вибрационного источника. Приборы и системы разведочной геофизики №1, 2021, стр. 27-35

3. Дергач П.А., Яблоков А.В., Зобнин Г.Ю. Результаты полевого тестирования портативного вибрационного источника поперечных волн. Доклад на конференции «Инженерная сейсморазведка и сейсмология 2023».

4. Лукашов А.А. Геолого-геомор-

фологическое строение и морфодинамика Воробьевых гор (г.Москва). Вестник Московского Университета, серия 5, География, № 5, 2008, стр.68-73.

5. Гиноман А.Г., Гранит Б.А. Инженерно-геофизические исследования карста на территории Москвы и Московского региона методом многоволновой сейсморазведки. Вестник МГСУ №4, 2010 г. стр.120-127.