

АРХЕОЛОГИЧЕСКАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА



И.А. Санфиров,
доктор технических наук,
заместитель директора
по научным вопросам,
Горный институт УрО РАН



А.Г. Ярославцев,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Горный институт УрО РАН



А.В. Чирков,
аспирант,
Горный институт УрО РАН



Ю.И. Степанов,
кандидат геолого-
минералогических наук,
ученый секретарь Горного
института УрО РАН

Представлены практические примеры нетрадиционного «гуманитарного» применения одного из основных методов разведочной геофизики – сейсморазведки. Оценены возможности решения ряда археологических задач.

Сейсморазведка – метод разведочной геофизики, основанный на изучении закономерностей распространения упругих волн, вызванных искусственным образом. Квалифицированное применение современных сейсморазведочных технологий позволяет получать изображение в амплитудах отраженных волн разного рода сложно-построенных погребенных геологических объектов (рис. 1) с достаточной точностью привязанных в пространстве.

В геофизической терминологии со словом «сейсморазведка» возможны различные сочетания. Они определяют: область применения (рис. 2), условия проведения (морская, наземная, шахтная, скважинная), особенности полевых технологий (взрывная, невзрывная). Во всех случаях дополнительные определения обуславливают конкретную специфику практической реализации сейсморазведочных исследований, заключающуюся в выборе аппаратуры, полевых методик, в содержа-

нии процедур цифровой обработки и интерпретации.

Наиболее традиционным является применение сейсморазведки при поисках и разведке месторождений углеводородного сырья. Для данного направления геологоразведочной отрасли сейсморазведка служит основным геофизическим методом. Менее широко распространены сейсмические исследования при изучении рудных месторождений и при инженерно-геологических изысканиях. Здесь до последнего времени более популярны различные электроразведочные и гравимагниторазведочные методы. Основная причина – затраты на сейсморазведочные исследования на единицу пространства существенно превышают затраты на любые другие виды геофизических исследований. В тех случаях, когда стоимость информации, получаемой сейсморазведкой, становится соизмеримой с затратами, предпочтение при выборе основного метода ис-

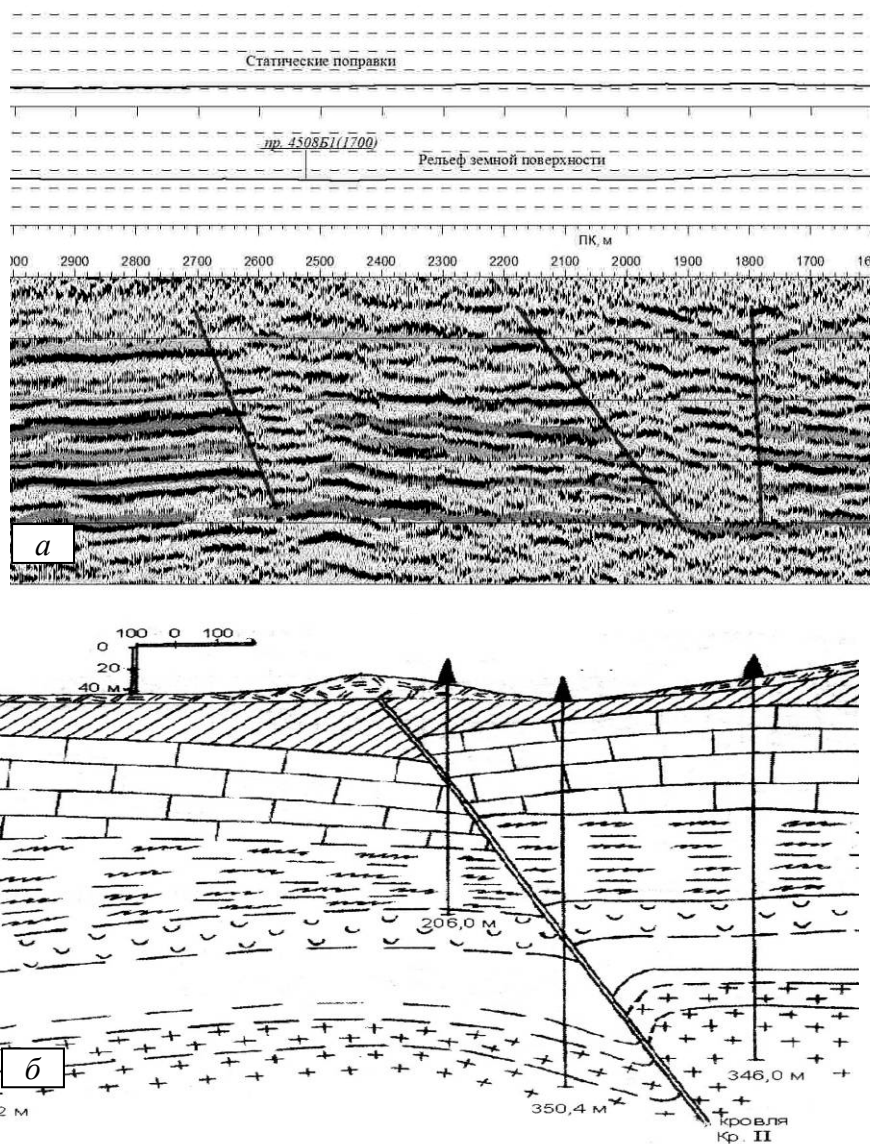


Рис. 1. Сейсмическое «изображение» (а) тектонического нарушения (б) по Н.М. Джиноридзе

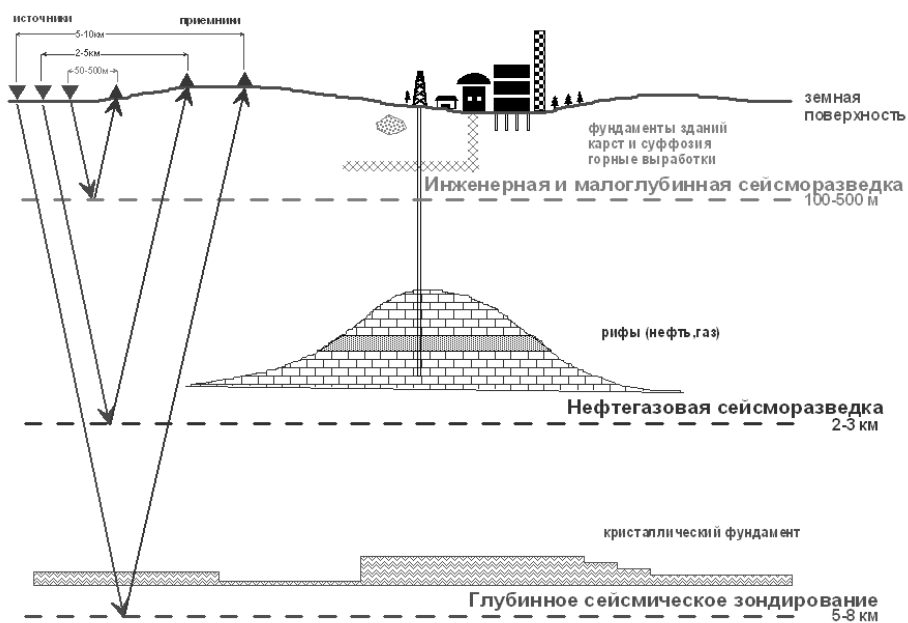


Рис. 2. Области применения сейсморазведочных исследований

следований отдается сейсморазведке. Подобная ситуация наблюдается в нефтегазодобывающей отрасли, при решении вопросов обеспечения безопасности подземной разработки водорастворимых месторождений полезных ископаемых [3], при оценке карстоопасности урбанизированных территорий [2].

Применение геофизических методов при проведении археологических исследований пока нельзя назвать массовым, что, безусловно, также связано с экономическим фактором. В условиях рыночной экономики для данной отрасли знаний самокупаемость, а тем более получение прибыли, достаточно проблематично. Наиболее широкое распространение здесь получили различные упрощенные электро- и магниторазведочные технологии. Их применение помимо относительной экономичности обусловлено и конкретными физическими обстоятельствами. Большинство артефактов связано с

изделиями либо из глины, либо из металла, которые характеризуются повышенной магнитной восприимчивостью и пониженным электрическим сопротивлением [1]. В отдельных случаях, связанных с изучением погребенных строительных сооружений, применение данных методов малоэффективно. В подобной ситуации наиболее эффективны сейсмические исследования. Это предположение основывается на существенной контрастности упругих свойств поисковых объектов и вмещающих их отложений [4]. В качестве примера рассмотрим результаты решения прямой задачи для модели погребенной горной выработки в медистых песчаниках, характеризующейся отрицательной акустической контрастностью относительно вмещающих отложений (рис. 3). Данные археологические объекты широко распространены на территории г. Перми.

Кровля выработки совпадает с кровлей коренных пород – песчаников ($V =$

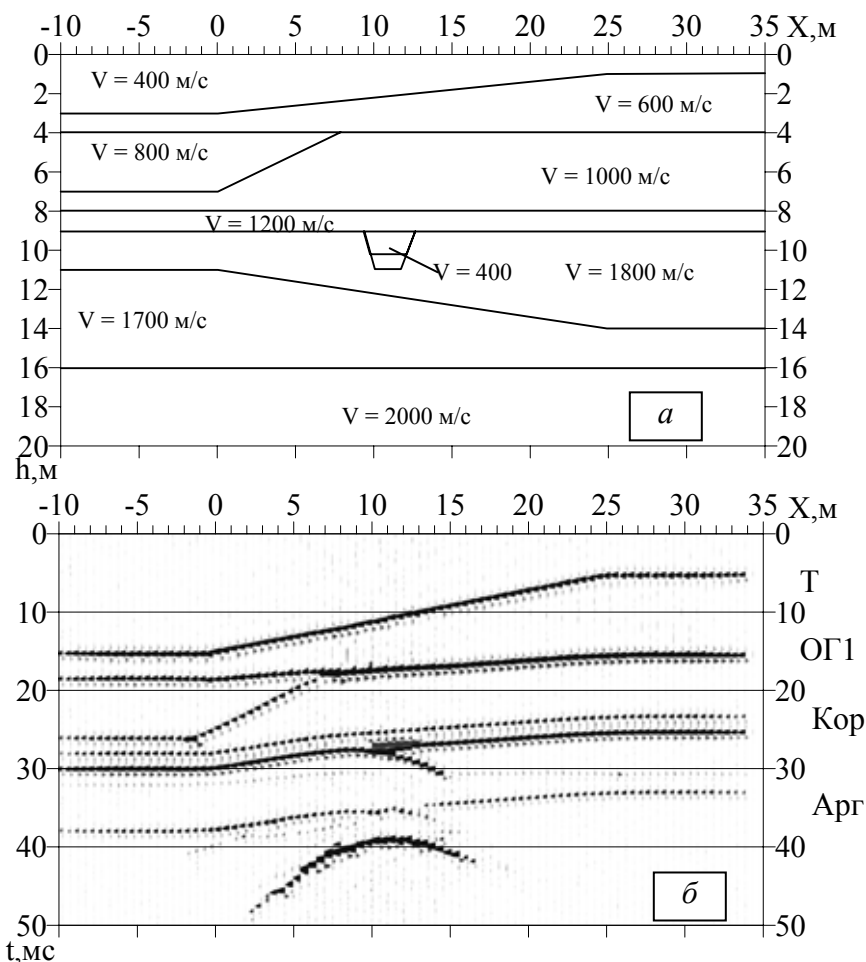


Рис. 3. Типовая сейсмогеологическая модель, включающая выработку (а), и полученный для нее синтетический временной разрез (б)

= 1800 м/с) и находится на глубине 9 м. Ширина выработки 3 м, высота 2 м. Пространство выработки частично заполнено обвальными-глинистыми отложениями, средняя скорость в выработке принята 400 м/с.

Из других особенностей модели следует отметить выклинивание пласта супеси ($V = 800$ м/с) в четвертичных отложениях с ПК0-ПК8 и наличие верхнего низкоскоростного слоя со скоростью 400 м/с, обусловленного насыпными техногенными отложениями. Подобные геологические нюансы характерны для разрезов пород четвертичного возраста на территориях градопромышленных агломераций.

В качестве исходного сигнала при моделировании выбран симметричный импульс с частотой $f = 800$ Гц. Все геологические границы нашли свое отражение на временном разрезе. Видимая частота суммарного временного разреза составляет около 400 Гц. Самое верхнее отражение (Т) достаточно контрастное и выдержанное по всей длине профиля, его поведение соответствует наклону подошвы насыпных отложений. Отражение от кровли суглинков (ОГ1) менее выдержанное. В районе пикетов ПК-10 – ПК7 наблюдается падение его интенсивности за счет сокращения мощности вышележащих водонасыщенных песков. Слабую интенсивность имеет ОГ2 (кровля четвертичных глин). В реальных условиях подобное отражение крайне сложно выделить на фоне помех. Из-за маленькой мощности пласта оно должно слиться в одну группу

с отражением от кровли коренных пород (КОР). Отражающий горизонт КОР приурочен к кровле песчаников, содержащих выработку. Данное отражение достаточно интенсивное, но в районе наличия низкоскоростной аномалии – выработки наблюдается инверсия фаз. Ниже по разрезу отмечается еще одно слабовыраженное отражение (АРГ) от кровли аргиллитов. Оно частично нарушается на участке с выработкой.

Основные особенности теоретического волнового поля связаны с наличием внесенных в модель неоднородностей. По уменьшению временной мощности наблюдается выклинивание пласта супеси. За счет включения в модель выработки:

- увеличивается время прохождения отраженной волной интервала разреза, включающего неоднородность;
- отражение от ложа выработки выглядит в виде отдельных отрезков осей синфазности гиперболической формы, напоминающих дифрагированные волны;
- происходит смещение в низкочастотную область спектра колебаний;
- наблюдается падение интенсивности нижележащих отражающих горизонтов за счет деструктивной интерференции отраженных и дифрагированных волн.

Подобный набор признаков отмечается и в реальных волновых полях. На рис. 4 представлены основные результаты цифровой обработки по сейсмическому профилю, пройденному в пределах территории с высокой вероятностью наличия

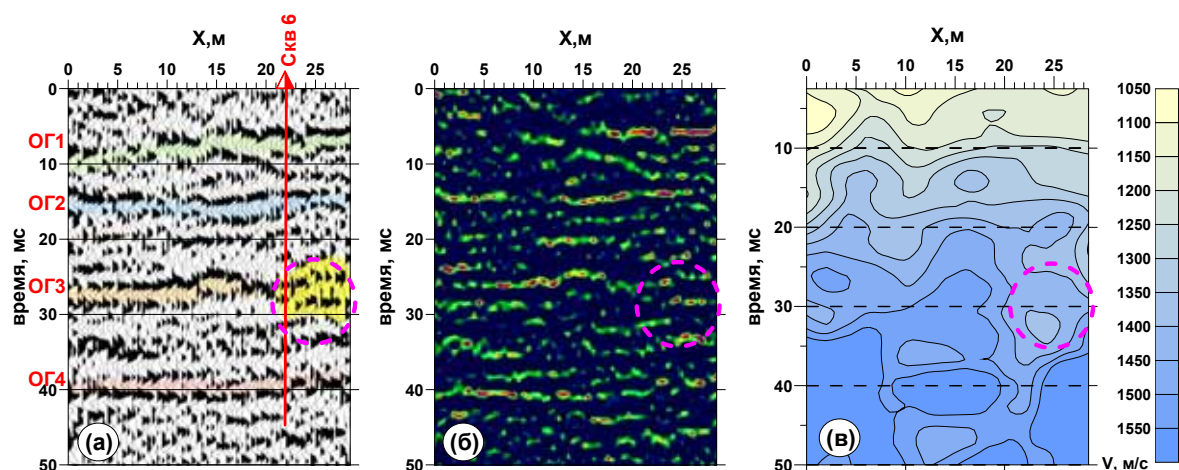


Рис. 4. Отражение погребенной горной выработки в результатах сейсморазведочных наблюдений: временной разрез ОГТ (а), его амплитудная (б) и скоростная (в) характеристики

погребенных горных выработок, в Мотовилихинском р-не г. Перми. В интервале песчаников между отражениями 2 и 4 отмечаются нарушения слоистой структуры волновой картины на уровне расположения горных выработок, повышенное затухание интенсивности сейсмической записи, дифракционные явления в краевых частях выделяемого участка, снижение значений скоростной характеристики. Подобные признаки присутствуют на участке в конце профиля. Для заверки результатов интерпретации пробурена скважина на 22 м от начала профиля, которая подтвердила наличие выработки.

Антиподом рассмотренного археологического объекта выступают погребенные строительные конструкции в виде стен, башен, фундаментов и т.п. Их физико-геологическая модель и основанная на ней интерпретационная идеология строятся, исходя из положительного контраста упругих свойств относительно вмещающих отложений. Подобного рода объект вскрыт при горизонтальном бурении склона оврага, ограничивающего площадь Тобольского Кремля (рис. 5).



Рис. 5. Обзорная схема и объект исследований – Тобольский Кремль

Бурение проводилось с целью построения ливневой канализации и последующего укрепления склона оврага со стороны Тюремного замка. В результате сейсмопрофилирования в пределах Тюремного замка на глубине более 20 м локализованы, предположительно, остатки древней постройки Кремля.

На рис. 6 видно, что в центральных частях обеих профильных линий на временных разрезах в интервале времен 25–

48 мс, что соответствует интервалу глубин 12,5–24 м, наблюдается резкое локальное поднятие. Его границы характеризуются повышенным затуханием интенсивности сейсмической записи за счет деструктивной интерференции с дифрагированными волнами.

Подобные волновые образы обусловлены присутствием в интервале суглинков высокоскоростных (плотных), относительно вмещающих неоднородностей, которые отчетливо проявляются в скоростных характеристиках временных разрезов. Таким образом, можно предположить, что обе аномальные зоны образованы одним и тем же погребенным объектом, который имеет субмеридиональное простираие вдоль борта склона и ширину порядка 6–9 м.

Помимо погребенных остатков древних сооружений, в пределах Тобольского Кремля по историко-архивным данным предполагается и наличие развитой сети подземных ходов. К наиболее перспективным на обнаружение подобных археологических объектов относится территория Гостиного двора (рис. 7).

На рис. 8 приведен пример результатов сейсморазведочных исследований вдоль стен Гостиного двора. На временном разрезе и его динамической характеристике выделяются две аномальные зоны. В их пределах отмечается нарушение прослеживаемости отражающих горизонтов и относительное затухание интенсивности сейсмической записи. Подобного рода волновые аномалии коррелируют с погружениями верхнего отражающего го

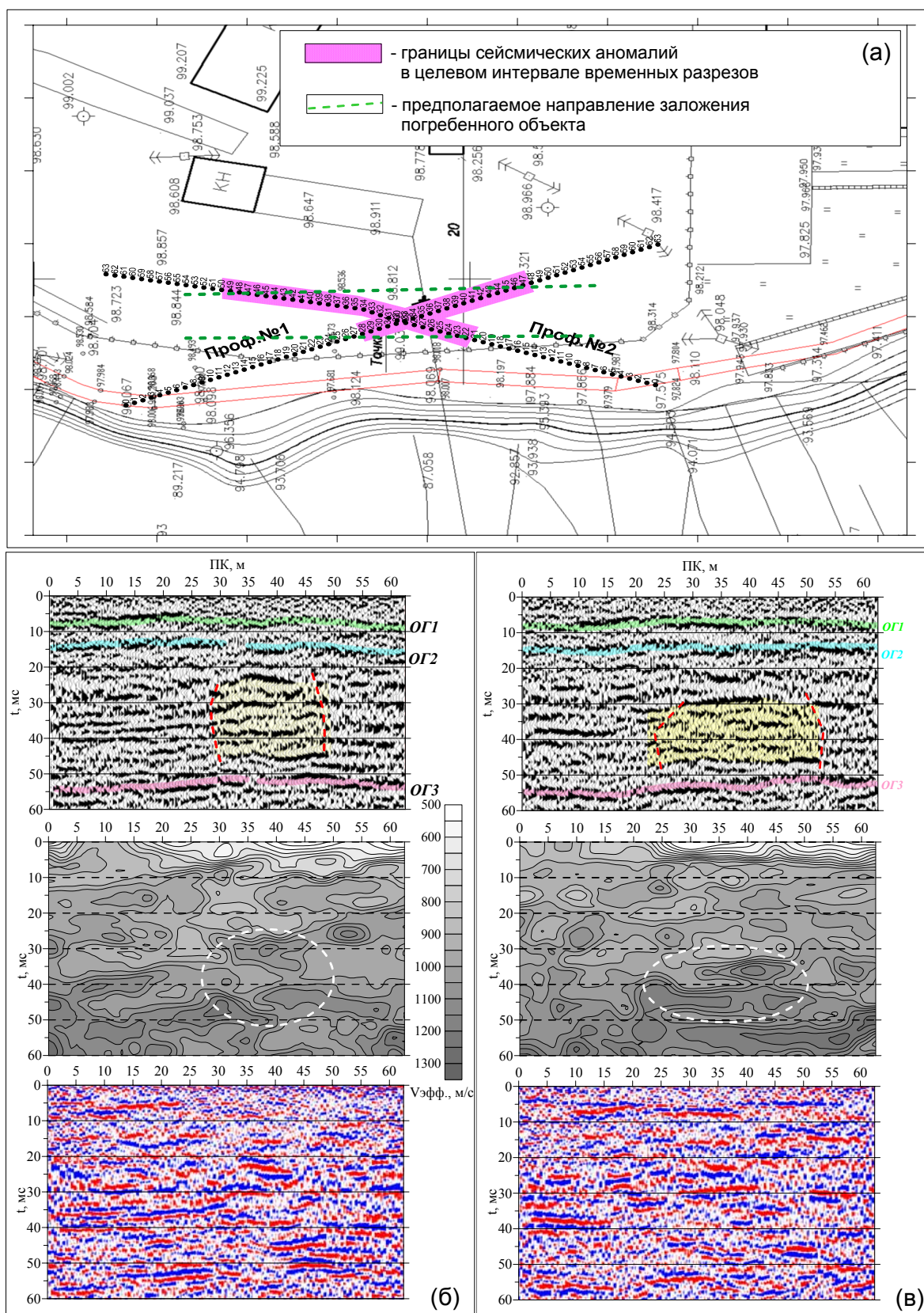


Рис. 6. Тюремный замок. Выделение погребенного объекта: а) схема профилей и результаты интерпретации; б) результаты обработки по профилю № 1; в) результаты обработки по профилю № 2



Рис. 7. Гостиный двор. Внутренняя площадь. Полевые наблюдения

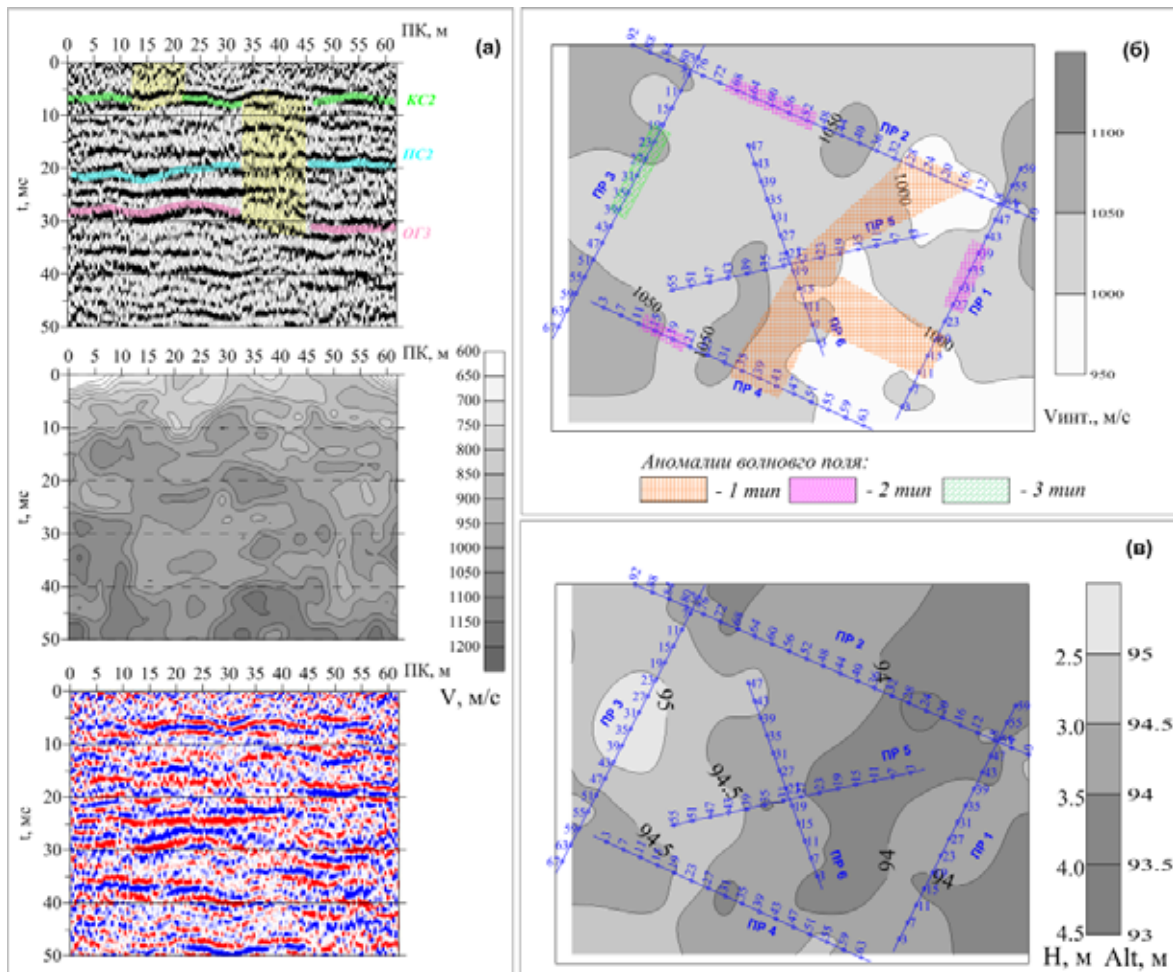


Рис. 8. Гостиный двор. Примеры результатов сейсморазведочных исследований: а) волновое поле и его характеристики; б) площадное распределение скоростей в интервале суглинков; в) рельеф подошвы суглинков

ризонта и низкоскоростными областями в интервале глубин от 3,5 до 6 м. Учитывая характер изменения параметров волнового поля и структурно-физических параметров исследуемого интервала разреза, определена предполагаемая конфигурация пустот (см. рис. 8). В центре данной зоны находится вход в частично засыпанный погреб.

Выявление и изучение археологических объектов связано с последующими проблемами их сохранности. В пределах того же Тобольского Кремля, недалеко от колокольни Софийско-Успенского собора, проходит Прямской взвоз, представляющий собой одетый в камень древний овраг, ведущий к выходу из Кремля (рис. 9), под зданием Рентереи (сокровищницы).

К началу четвертого столетия своего существования стены начали рушиться. Виновато в этом не только время, но и перераспределение подземных водных потоков за счет урбанизации окружающих территорий. По результатам сейсморазведочных работ [5] у стен взвоза удалось выделить локальные прогибы с амплитудой до 1 м, которые могут быть боковыми подземными руслами, подходящими к склонам погребенного оврага, по которому проходит взвоз. В нижней половине

надземной части стен, в районе стыковки с предполагаемыми руслами подземных водных потоков, настенными сейсмическими исследованиями выделены ослабленные зоны (расслоение) (рис. 10). На основании анализа детализационных сейсмоакустических и георадарных исследований в пределах наиболее разрушенной стены взвоза оценены размеры ее основных конструктивных элементов, включая фундамент. Определены места наибольшей влажности кирпичной кладки, которые совпали с местами ее расслоения.

Рассмотренные примеры, безусловно, охватывают не весь спектр возможных археологических ситуаций, но представленные результаты позволяют рассматривать сейсморазведочные исследования с применением современного аппаратурно-методического обеспечения как одно из перспективных направлений неразрушающей инструментальной археологии. Наиболее эффективно их применение в тех случаях, когда объекты, представляющие археологический интерес, связаны с инженерно-геологическим строением исследуемой территории, т.е. приурочены либо к конкретным отложениям, либо к особенностям погребенного палеорельефа.



Рис. 9. Внутренний (а) и внешний (б) вид Прямского взвоза

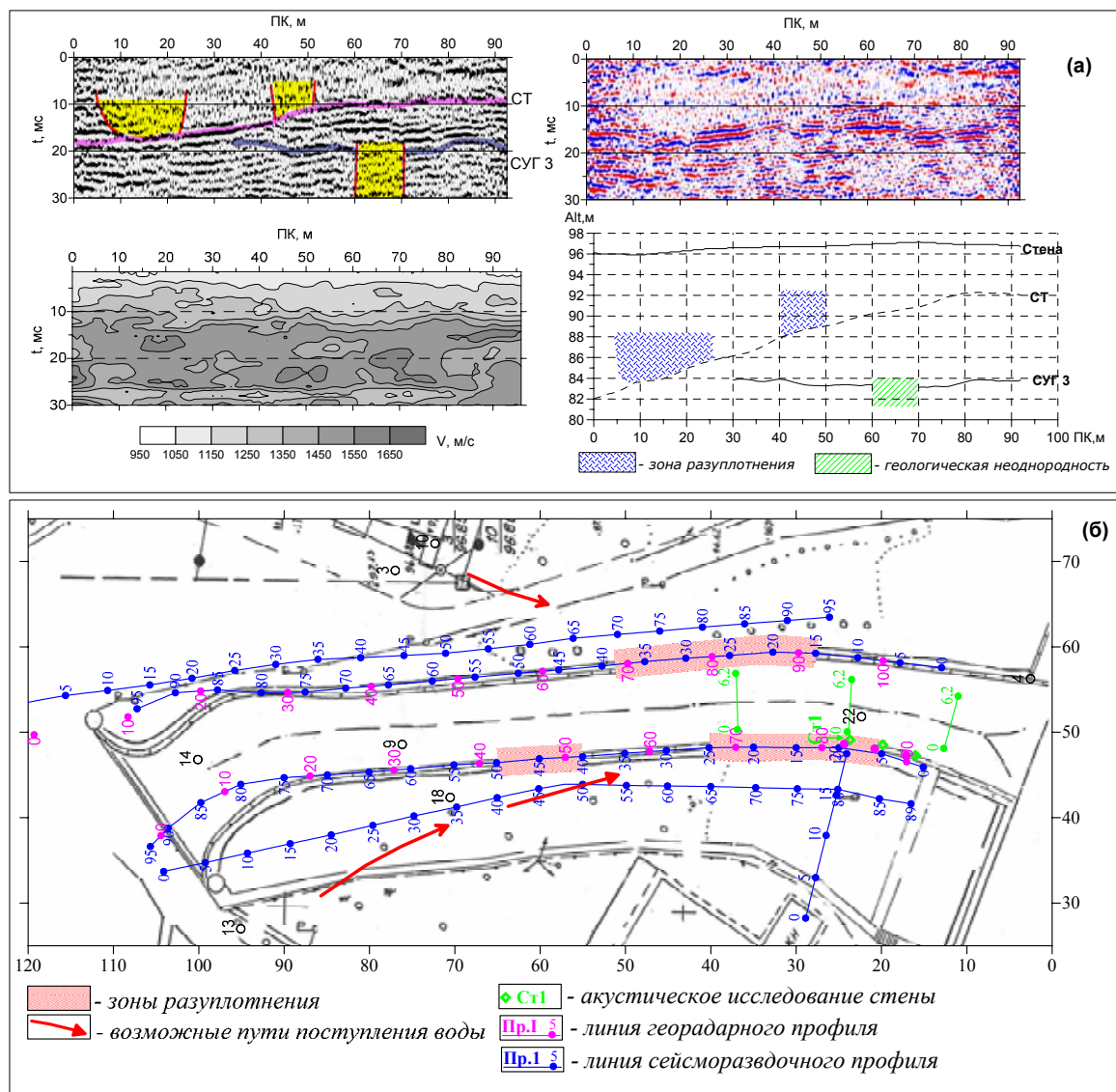


Рис. 10. Сейсморазведочные исследования Прямокого взвоза: а) результаты обработки по настенному профилю; б) схема результатов интерпретации

Библиографический список

1. Журбин И.В. Геофизика в археологии: методы, технология и результаты применения: автореф. дис. ... д-ра ист. наук. – М., 2006.
2. Методические рекомендации по проведению инженерно-геологических изысканий на карстоопасных территориях (на примере Пермского края). – М.: ГИ УрО РАН, ОАО «ПНИИИС», 2009.
3. Санфиоров И.А. Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 168 с.
4. Ярославцев А.Г. Сейсморазведочные технологии оценки воздействия горных работ на верхнюю часть разреза: автореф. дис. ... канд. тех. наук. – Пермь, 2003.
5. Sanfirov I.A., Prigara A.M., Stepanov Y.I., Timofeeva G.A. Near surface geophysical investigation of the 16 century fortress deformation reasons // EAGE international conference. – S-Peterburg, 2006, 4 p. CD.