

## Экологическая и инженерная геофизика

~~Высокоразвитые геофизические методы для изучения водных путей~~ on inland waterways

оптимальных результатов при изучении сети внутренних водных путей

**Тамас Тот (Tamas Toth)<sup>1</sup> из Венгерской изыскательской компании Geomega приводит убедительное свидетельство того, почему интегрирование геофизических методов дает наилучший результат при изучении объектов мелководья в экологических и инженерных целях.**

**Д**етальное моделирование мелководья часто является обязательным этапом при выполнении инженерных и экологических исследований. Сочетание высокоразрешенных геофизических исследований с бурением малоглубинных скважин может быть эффективным решением при таких работах. Во многих случаях важным шагом является просто перевод информации 1D, получаемой из скважин в 2D, или еще лучше, в 3D, используя геофизические методики. Очевидно, этот шаг является принципиально важным на тех участках, где толща характеризуется высокой степенью изменчивости по вертикали и/или горизонтали.

Всем известно, что высокая изменчивость обычно типична для приповерхностной зоны, и картирование верхней части разреза 3D с использованием геофизических методов может сложной задачей. Это особенно свойственно областям, покрытым водной толщей. Природные или искусственные водные пути, озера, реки и каналы часто представляют препятствие при картировании просто по причине труднодоступности. Удачной противоположностью является то, что во многих случаях, выполнение геофизических исследований на акватории более просто, быстро и следовательно, дешевле, чем подобное исследование на суше. Иногда разрешение съемки, выполненной на акватории, выше, чем наземной съемки. Это свойственно, например, сейсмическим исследованиям.

Изучение областей, находящихся под водой, несет в себе трудности, но некоторые из них можно преодолеть, применяя новые методики. Хорошим примером является вопрос определения местоположения, который был сложной проблемой в условиях акватории несколько десятилетий назад, но стал относительно простым в наши дни благодаря использованию высокоточных GPS технологий (DGPS и RTK GPS). Точность привязки стала адекватна самим высокоразрешенным геофизическим исследованиям, делая осуществимым выполнение детальных работ 3D на акваториях.

Каждый геофизический метод имеет свои ограничения, в руках геофизиков нет 'магического инструмента'. Сейсмические, электрометрические, электромагнитные или магнитные методы могут применяться как отдельно, так и в комбинации, в зависимости от поставленной задачи. Однако, мы убеждены, что во многих случаях применение и более, чем одного геофизического метода может увеличить значимость получаемых результатов. Примером этого является комплексирование сейсмического метода и

георадара, которое дает возможность рассчитывать напрямую такие физические параметры как плотность, скорость распространения акустических и электромагнитных волн.

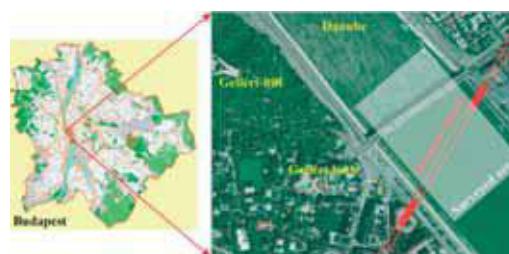
В этой работе представлены примеры геофизических работ на акватории, особое внимание уделяется важности картирования 3D. Также мы обсудим пример комплексирования данных сейсмических и георадарных работ с целью экологических исследований.

### Расширение границ сейсморазведки

Сейсморазведка традиционно использовалась для определения мощностей и стратиграфического и тектонического картирования слоев земной толщи. Основной проблемой высокоразрешенного картирования является зона малых скоростей, которая залегает в верхней части разреза. Высокие частоты, которые особенно актуальны при высокоразрешенном картировании, особенно быстро затухают в зоне малых скоростей. Это очевидное ограничение разрешению, которое можно было обеспечить в глубокой части разреза. Исключением являются участки, покрытые водой, водный слой передает частоты выше 1 кГц без сильного затухания. Слои, залегающие под толщей воды, даже, будучи неконсолидированными, обычно полностью насыщены водой, поэтому передают высокочастотные акустические волны (выше кГц) с незначительным ослаблением.

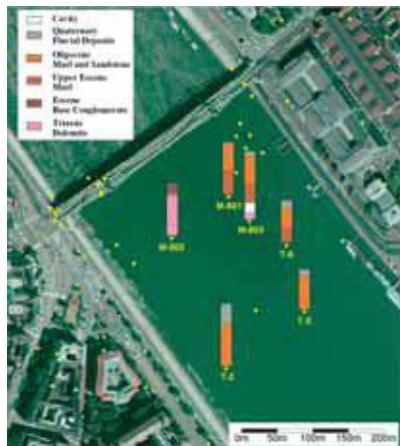
Поэтому для работ на акватории частоты источника сейсмических волн имеют более широкий диапазон.

Применяют не только верхние части шкалы звуковых частот, но и ультразвуковой диапазон. Глубина проникновения в слой осадков, конечно, зависит от частотного состава применяемого источника. Верхние части частотного диапазона, которые представлены источниками акустических волн с центральной частотой в несколько сотен кГц, дают изображение дна высокого разрешения, но с трудом проникают



**Рисунок 1** Карта района сейсмических исследований, проводимых в центре Будапешта.

## Экологическая и инженерная геофизика



**Рисунок 2** Скважинная информация явно указывает на присутствие триасовых доломитов на небольшой глубине под речным дном



**Рисунок 3** Система позиционирования при проведении одноканальной съемки является комбинацией DGPS и лазерного авто теодолита. Обе системы позиционирования установлены на опорной точке над точкой ОГТ одноканальной ультра высокоразрешающей сейсмической системы.



**Рисунок 4** Расстановка многоканальной системы сбора сейсмических данных. Стрелками помечены антенны DGPS, установленные на пароме, антенны GPS на хвостовых буях и призма над источником. На небольших вставках отмечены установки GPS и призм на хвостовом буе и источник, соответственно.

в осадки. При сейсмических работах на акватории с экологическими целями обычно используются частоты от частот гидролокации до частот сейсмических источников, которые разработаны для нефтяных морских работ. Диапазон частот бумера и спаркера лежит между несколькими сотнями Гц и несколькими десятками кГц, в зависимости от типа источника и его энергии. С использованием этих источников разрешение сейсмической записи может возрасти до дециметровой шкалы, а максимальное проникновение будет равно нескольким десяткам метров. Это именно то, что требуется при малоглубинных исследованиях.

Подобные исследования дают ценную информацию о подземной толще с целью изучения возможности снабжения питьевой водой, о процессах осадконакопления, для планирования и мониторинга драгирования, для поддержания работы водных путей, восстановления высохших рек или помощи при инженерном планировании строительства мостов, тоннелей дамб или плотин.

### Малоглубинная сейсморазведка в центре Будапешта

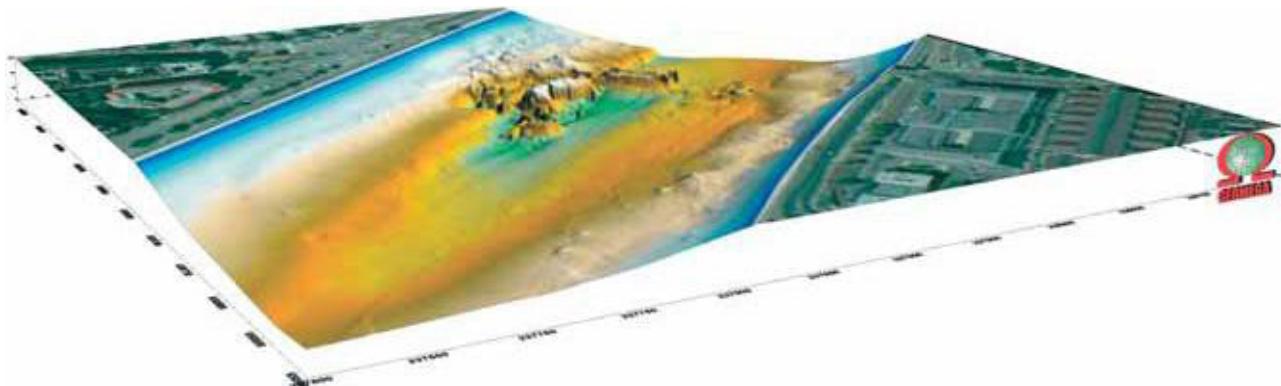
Типичным примером геофизической съемки с инженерными или экологическими задачами была сейсмическая съемка на реке Дунай, в центре Будапешта, Венгрия, которая предшествовала бурению подземного тоннеля под рекой Дунай (Рисунок 1).

Из более ранних исследований стало известно, что закарстованный доломит Геллертхилл является основным резервуаром термальных вод известных источников Геллерт-Спрингс и группы других термальных источников далее к северу вдоль по реке Дунай. Данные бурения (Рисунок 2) показали, что те же триасовые доломиты в этой части Дуная залегают непосредственно на дне и глубже. Подробная морфология триасовых доломитов и систем разломов не была известна до выполнения работ, которые были предназначены для планирования нового подземного тоннеля под Дунаем.

С одной стороны имелись некоторые опасения инженерного характера, поскольку постройка тоннеля в триасовых доломитах или эоцен-олигоценовых мергелях и песчаниках и более молодых речных осадках требует применения различных технологий. С другой стороны, экологическое воздействие могло бы оказаться значительным, поскольку система разломов и пустот внутри и вокруг триасовых доломитов могла быть связана с известной системой трещин окрестных термальных источников. Ближайший из самых известных — термальные ванны отеля Геллерт (Рисунок 1). Одна из самых рискованных и наименее изученных секций запланированного подземного тоннеля, шла под участком Дуная. Поэтому детальная модель строения недр была необходимой для принятия решения на конечном этапе планирования тоннеля.

Данные высокоразрешенной многоканальной и ультра высокоразрешенной одноканальной съемки были получены местной компанией Geomega и компанией, базирующейся в Великобритании Exploration Electronics на Дунае в черте Будапешта в конце февраля 2001 года. Целью съемки было получение 3D изображения морфологии дна и геологического строения поддонной толщи вблизи Геллерт-хилл.

## Экологическая и инженерная геофизика



**Рисунок 5а** Перспектива морфологии дна изученной части Дуная. Направление течения реки – с северо-запада на юго-восток, изображение дано с юго-востока. К изображению применен коэффициент вертикального растяжения равный двум.

### Комплексирование

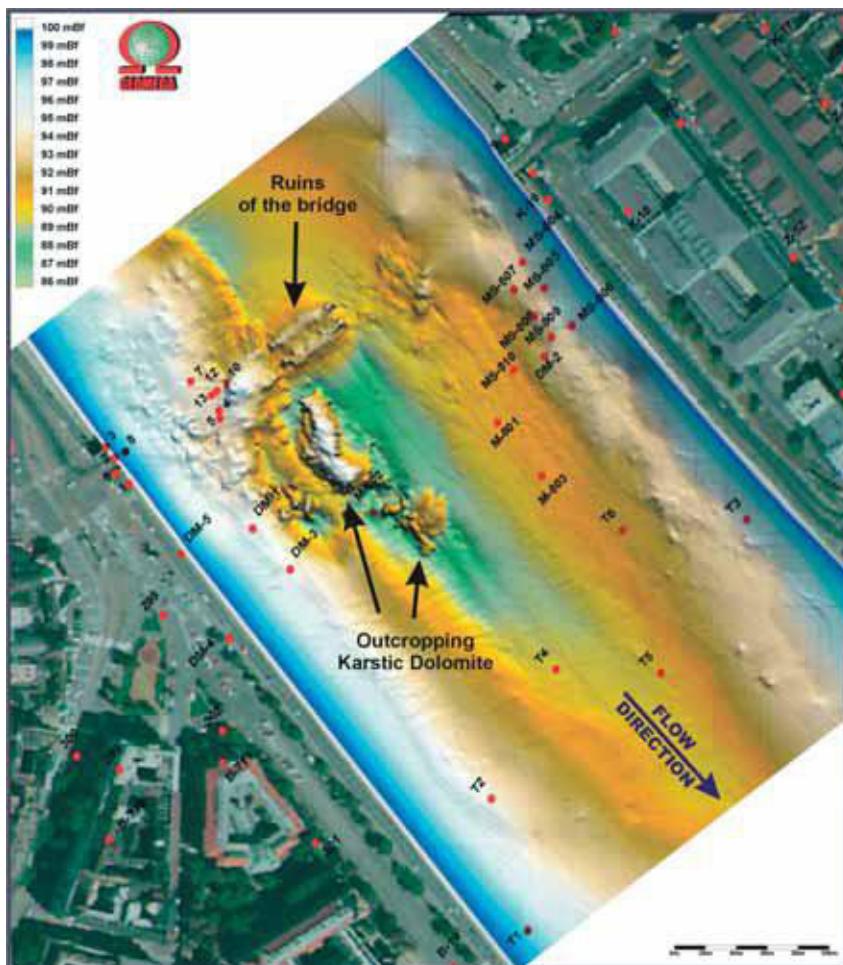
#### одноканальных и многоканальных данных

Исследуемая область имеет размеры 500м x 300м, она начинается выше моста Забадзаг и заканчивается на несколько сотен метров к югу от моста. Сложной была не только геология района; проблему при обработке и интерпретации создавали боковые отражения от Дунайского вала, дифракции от опор моста и других подводных объектов. На области изучения были проведены две независимые сейсмические съемки, одна с одноканальным сейсмическим профилографом SEISTEC, другая с многоканальной станцией и

пневмопушкой Sodera, 15 дюймов<sup>3</sup>.

Точность привязки всегда крайне важна для любой высокоразрешенной съемки. В случае одноканальных данных это была только одна точка, точка ОГТ системы, положение которой определялось при регистрации данных. Для многоканальных работ, должно было определяться положение каждой точки возбуждения и каждой точки сейсмоприемника. Проблема усложнялась течением воды и в нашем случае, наличием моста над областью исследования, который являлся препятствием GPS.

Принимая во внимание все эти трудности, была применена комбинация из нескольких приемников GPS и лазерный автотеодолит, базирующийся на берегу.

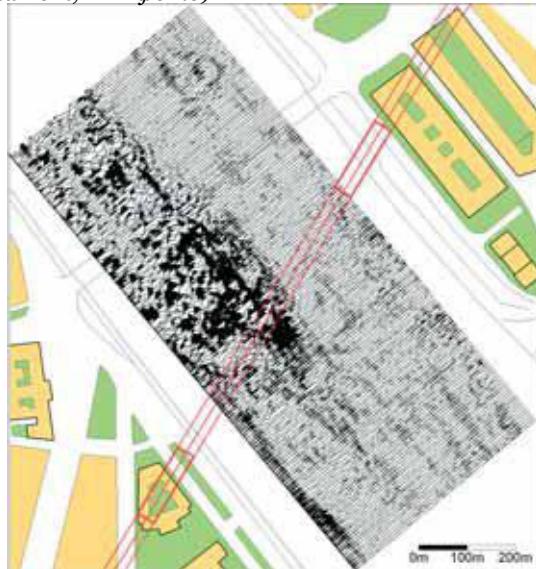


**Рисунок 5б** Карта морфологии дна области исследования. Помечены руины моста, взорванного во время второй мировой войны и обнажения триасовых доломитов. Красными точками отмечены положения скважин, пробуренных перед началом проведения работ.

## Экологическая и инженерная геофизика



**Рисунок 6** Начало профиля высокоразрешенной многоканальной съемки. (Фото любезно предоставлено Гиала Том, MTI фото)



**Рисунок 7** Глубинный срез куба данных 3D, полученный по данным многоканальной сейсморазведки. Красной линией отмечено запланированное направление тоннеля перед проведением исследований. Высокоамплитудные отражения указывают на присутствие триасовых доломитов.

Системой определения местоположения при выполнении одноканальных сейсмических исследований были DGPS и лазерный теодолит. Антенна GPS и призма лазерного теодолита были установлены над точкой ОГТ системы (Рисунок 3). Позиционирование DGPS обеспечивало точную привязку в реальном времени навигационных данных, тогда как использование лазерного теодолита было актуальным под мостом.

Система позиционирования многоканальной сейсмической системы была более сложной. Работа выполнялась с помощью 24 канальной косы, буксируемой за судном. Косы буксировались с двух сторон, источник располагался между ними. На пароме, буксирующем косы, были установлены две антенны DGPS, которые определяли не только положение, но также и вращение парома.

Приемники GPS были установлены на каждом хвостовом буе, обеспечивая определение позиций после обработки DGPS. Призма лазерного теодолита была установлена над точкой источника (Рисунок 4). Была написана компьютерная программа расчета позиции каждого гидрофона для каждого возбуждения по данным позиционирования, упомянутым выше. В добавок к горизонтальному расположению, глубиной погружения каждого кабеля управляли два блока управления глубинами - Digibird.

Ультра высокоразрешенная одноканальная съемка дала детальную 3D карту дна (Рисунок 5а, б) и основания речных отложений. Идентификация обнажения триасовых доломитов на речном дне было произведено напрямую, на основе определения характеристик сейсмических изображений. К югу от моста идентифицируются два крупных доломитовых тела, более мелкое пересекает проектируемую траекторию тоннеля, более крупное расположено между мостом и подводным тоннелем. Это позже было подтверждено водолазами. Скальные выходы на речном дне имели очень крутой угол наклона, иногда вертикальный или с нависанием, более 6м высотой. Другой интересной аномалией был найденный мост Забадзаг ('Руины моста' на Рисунке 5б). Это средняя часть старого Забадзагского моста, разрушенного во время второй мировой войны. Остатки почти полностью покрыты молодыми речными отложениями, а верхняя часть конструкции все еще наблюдается на речном дне.

При выполнении многоканальной регистрации данных, был использован минимальный вынос 4.5м и максимальный вынос 62.5м. Профилирование выполнялось вдоль параллельных профилей. На рисунке 6 показано развертывание кос с парома на начале нового профиля. Всего было записано 27,250 пунктов возбуждения по 42 профилям. Зарегистрированные данные были пересортированы по 3.125 x 3.125м бинов ОГТ и обработаны для получения 3D изображения района. Было проведено суммирование, миграция во временной и глубинной областях кубов. На Рисунке 7 представлен глубинный срез 20м ниже поверхности воды. Это приблизительно интервал глубин, на котором будет расположен планируемый тоннель под Дунаем. Картирование протяженности закарстованного доломита на различных уровнях глубин стало возможным благодаря использованию многоканальных сейсмических данных.

Окончательным результатом исследования стала тектоническая карта на основе интерпретации ультра высокоразрешенных одноканальных данных, данных высокоразрешенных многоканальных сейсмических исследований в сочетании со скважинными данными по району исследований. Изолинии показывают кровлю тела закарстованного доломита, залегающего под дном (Рисунок 8). Из результатов исследования становится очевидным, что запланированная траектория тоннеля заденет тело триасовых доломитов под Дунаем. С целью того, чтобы избежать бурения закарстованных доломитов, после анализа инженерных и экологических вопросов траектория тоннеля была изменена и переместилась к юго-востоку.

## Экологическая и инженерная геофизика

### Комплексирование сейсмических и

### георадарных исследований на акватории

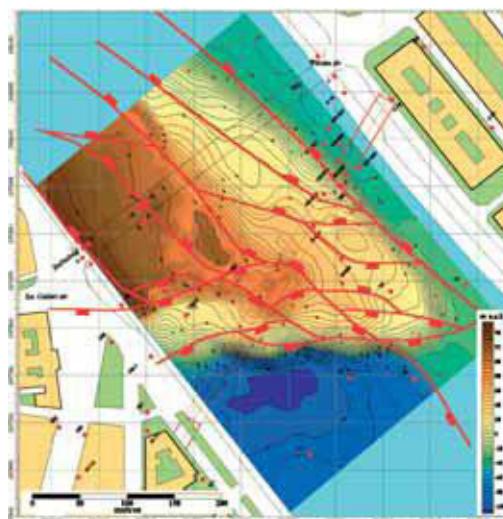
Возможно самым большим препятствием сейсмическим исследованиям ультра высокого разрешения (с преобладающими частотами выше 1 кГц) является присутствие газа в осадках. В мелководных озерах каналах, которые не были драгированы, можно найти биогенный материал, который разлагается в иллистом слое, залегающем сразу на дне. Газ (преимущественно биогенный метан), заполняющий только незначительный процент порового пространства, может полностью замаскировать нижележащие слои. В этом случае должна быть найдена альтернативная геофизическая методика.

Метод георадара с подводной антенной в пресной воде представляет собой достойную альтернативу. Электромагнитные волны чувствительны к различным физическим свойствам (они скорее электромагнитные, чем акустические), но георадар дает изображение, которое ближе к сейсмическому, поскольку во многих случаях одна и та же граница отображается как на сейсмическом, так и на радарном профиле.

Преимущества этой комбинации были тестиированы за два года выполнения проекта Geowaters, финансируемого Европейским Сообществом. Основной целью проекта была разработка методики комплексирования геофизических данных для измерения и мониторинга молодых и потенциально загрязненных осадков в Европейских пресноводных водоемах. Эти молодые осадки, во многих случаях неконсолидированные илистые осадки, могут представлять собой экологическую проблему: эти осадки могут загрязнять питьевую воду. Геофизическая технология позволяет картировать эти слои с помощью метода, который неагрессивен к окружающей среде и оказывает малое влияние на экологию.

В рамках проекта Geowaters, было проведено тестирование с помощью партнеров в 10 различных точках в Греции, Венгрии, Словакии и Нидерландах. Пункты тестирования показаны на Рисунке 9, они включают в себя природные и искусственные пресноводные озера, восстановленные котлованы, рукава рек и каналы. Основной идеей было тестирование систем одноканальной ультра высокоразрешенной сейсмической системы (IKB-Seistec) и системы погружного георадара (Zond-12). Погружная антenna георадара 500 МГц, используемая в проекте, была разработана и построена одним из партнеров по проекту, компанией Radsys, Латвия. Также на выбранных пунктах наблюдения проводились измерения электрического сопротивления и магнитной восприимчивости.

Пока было возможным, параллельно проводились сейсмические и георадарные исследования. Пример этого показан на Рисунке 10, две системы буксируются по обе стороны от исследовательского судна. Определение местоположения для каждой системы выполнялось путем использования независимых антенн DGPS, а запись данных была синхронизирована. Это сделало возможным проводить прямое сравнение и совместную оценку сейсмических и георадарных данных. На рисунке 11 показан пример пары профилей. На этих двух профилях можно наблюдать различные характеристики сейсмических и георадарных данных. На сейсмических данных мы видим четкое основание илистых осадков в левой части профиля. Ближе к берегу (двигаясь к правой части профиля) илистый слой выклинивается, и рядом с



**Рисунок 8** Тектоническая карта района работ с планируемой, до проведения исследований, траекторией тоннеля.



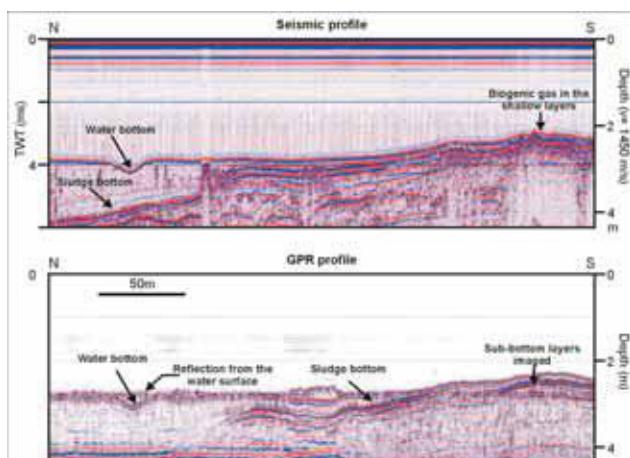
**Рисунок 9** Расположение пунктов наблюдения в проекте Geowaters.



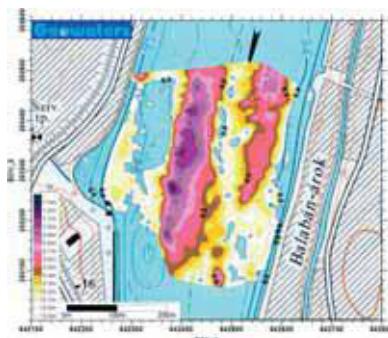
**Рисунок 10** Одновременное выполнение сейсмических и георадарных наблюдений surveys. берегом его частично заполняет биогенный газ. Это полностью маскирует более глубокие горизонты, глубина проникновения практически уменьшается до нуля.

На георадарном профиле показаны схожие отражающие горизонты, но там имеются другие особенности. Важным отличием является то, что сейсмопрофилограф буксировался у поверхности воды, тогда как

## Экологическая и инженерная геофизика



**Рисунок 11** Сейсмический (верхний) и георадарный (нижний) профили, полученные одновременно. В правой части профиля, ясно виден эффект маскировки мелководным газом более глубоких горизонтов, этот эффект не влияет на радарные данные. В левой части профилей, однако, отличие по глубинности существенное. В этом месте проникновение акустических волн глубже. (Заметим, что к каждому из профилей применено вертикальное растяжение).



**Рисунок 12** Мощность ила в изучаемой части притока Дуная.

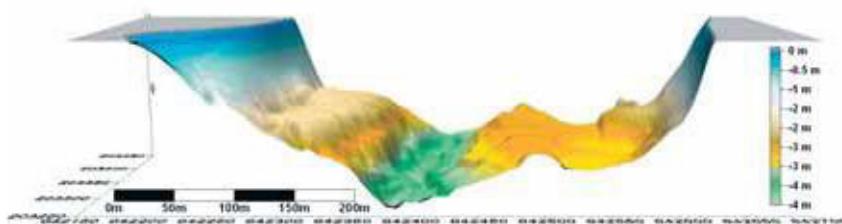
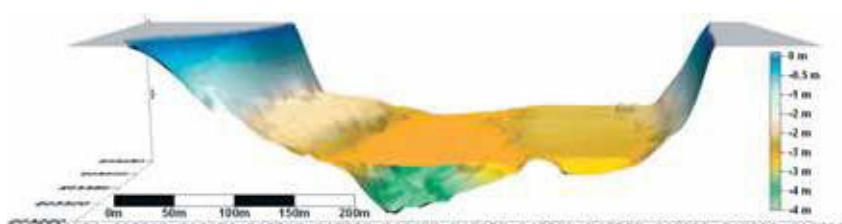
антенна радара была помещена на половине расстояния от дна. Поэтому, отражения от поверхности воды интерферирует с отражением от дна. Можно наблюдать существенные различия глубинности двух систем съемки. В областях, не зараженных биогенным газом, глубинность сейсмического метода существенно больше (левая часть профиля); для волн электромагнитных биогенный газ не представляет собой препятствия (правая часть профиля). Две методики дополняют одну другую.

### Съемка на закрытом притоке Дуная

Комплексные сейсмические и радарные исследования были выполнены на притоке Дуная Ракеве-Сорокар к югу от Будапешта. Целью исследования было картирование мощности отложений илестого слоя на тестовом участке. Этот приток Дуная достигает в длину 57.3 км и последние 70 лет он был закрыт шлюзом с двух концов. Из-за шлюза уровень воды почти постоянен и скорость течения воды очень мала (0.2-0.4 км/ч). Осаждаемый ил с момента закрытия шлюзов заполнял первоначальное ложе реки. При восстановлении этого участка ил будет убираться и безопасно вывозиться. Одну из основных проблем представляет неизвестный объем и распределение ила. Надежные современные карты водного дна существуют; однако никакой информации о морфологии дна до закрытия шлюзов не имелось.

До проведения полевых тестов по проекту Geowaters, никакие компании при проводимых ранее съемках не могли так надежно закартировать мощность и распределение слоя ила. Процесс восстановления был начат в 2001 в северной части рукава реки, картирование мощности слоя ила было выполнено с использованием 'классического' метода втыкания мерных шестов в слой ила.

Важным результатом тестов Geowaters было быстрое и надежное картирование илестого слоя.



**Рисунок 13** Подошва ила (на нижнем рисунке) сохранила морфологию речного дна до замыкания речного рукава. Современное дно реки (верхний рисунок) почти плоское из-за отложения тонкозернистых осадков из стоячей воды. Цветные шкалы идентичны.

## Экологическая и инженерная геофизика

На Рисунке 12 четко зафиксирован факт вариации мощности ила по площади. Измеряемый участок притока реки приблизительно 400 м длины содержит порядка 45,000 м<sup>3</sup> ила, распределенного крайне неравномерно.

Это означает в среднем 110,000 м<sup>3</sup> ила на км.

Распределение илистого слоя отражает морфологию морского дна до закрытия двух концов этого притока Дуная. Это становится очевидным на Рисунке 13. На нижнем рисунке показана морфология илистого дна, которая идентична морфологии речного дна до замыкания рукава. На верхнем рисунке показано речное дно, заполненное илом. Морфология четко указывает на отложения в стоячей воде, которое способствует образованию практически плоского дна.

Надежные оценки объемов илистого слоя были существенны для планирования необходимой инфраструктуры и оценки стоимости процесса восстановления. Точное знание распределения ила крайне важно для успешной операции по вывозу ила.

### **Заключение**

Высокоразрешенные геофизические методы являются экономически эффективным способом изучения верхней части разреза. Это особенно верно для

случая акваторий, где проведение бурения трудно. На многих инженерных и экологических объектах, геофизические исследования могут дать ценную информацию при меньших расходах, чем любой другой метод. Во многих случаях, однако, 2D подход с применением только одного метода не является подходящим способом выполнения работы. Ключевым является планирование 3D съемки и/или комплексирование различных методов.

### **Благодарность**

Проект Geowaters финансировался Европейским Сообществом в рамках FP5, номер контракта: EVK1-CT-2001-30009. Мы высоко ценим финансовую поддержку и активную работу со стороны партнеров по проекту: Scanlink (Нидерланды), Selor Eeig (Нидерланды), Terramentor Eeig (Греция), Mar (Нидерланды), Геофизической лаборатории Университета г. Тессалоники (Греция), Hydeko-KV (Словакия), Fractal (Венгрия) и Radar Systems (Латвия). Мы хотим выразить благодарность Брюсу Алену и его команде из компании Exploration Electronics (Великобритания) за их работу на реке Дунай. Пит Симкин из IKB (Канада) несколько раз оказывал нам ценную помощь. Его поддержка всегда очень ценилась нами. Мы благодарим компании BVK и Eurometro (Венгрия) за разрешение на публикацию материалов по проекту подводного тоннеля.