

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГЕОАРХЕОЛОГИИ

Анализ условий залегания артефактов, найденных в местонахождениях (Медведев и др., 1998), подтверждает необходимость получения информации о геологических и физических характеристиках объектов, слагающих верхнюю часть разреза. Информационные технологии позволяют процесс ее получения довести до логического завершения в виде геоинформационной модели, являющейся одним из вариантов представления условий существования обнаруженных артефактов и прогнозирования возможных местонахождений. Ниже приводятся некоторые из результатов применения комплекса полевых геофизических исследований и технологии камеральной обработки, направленных на решение задач стратиграфии, палеогеографии и геоархеологии. Исходные материалы для этих исследований были получены при проведении комплексных геолого-геофизических и археологических работ на нескольких участках Прибайкалья. В качестве примеров таких участков в данной статье используются район строительства мостового перехода через р. Ангара (500 м ниже по течению от плотины Иркутской ГЭС) и Мальтийский археологический комплекс (п. Мальта, Иркутская область). Местонахождения, выявленные на этих участках, являлись натурной основой при проведении международного археологического конгресса в августе 2001 года (Генералов и др., 2001). В работах участвовали сотрудники лаборатории археологии и палеоэкологии ИГУ, кафедры прикладной геофизики и геоинформатики ИргТУ и Института земной коры СО РАН (Слагода и др., 2001).

Проблема описания условий залегания и процессов формирования археологического объекта состоит в том, что для местонахождений палеолита-мезолита Прибайкалья характерна сложная геологическая ситуация залегания рыхлых толщ, содержащих археологический материал. Такой характер геологической обстановки объясняется резкой сменой режимов осадконакопления и как следствие многообразием денудационных процессов, образовавших стратиграфические несогласия, криогенными явлениями в сочетании с генезисом формирования осадочного комплекса четвертичных отложений.

Тектонические процессы для описываемого региона имеют достаточно высокую динамику, и в условиях резко изменяющегося рельефа кровли подстилающих пород также внесли свою лепту в общую картину. Поэтому для удовлетворительного описания археологического объекта, сформированного в среде такого уровня сложности, необходима информация о поведении и величине тех факторов, которые оказали наиболее существенное влияние на его генезис. К таким факторам можно отнести неотектонику, криолитообстановку, результаты денудационных процессов и другие, отражающиеся в изменении физических свойств литологических комплексов, слагающих исследуемый разрез.

Создание физико-геоархеологической модели описываемого объекта как части общей комплексной геоинформационной модели (ГИАМ) позволяет определить все необходимые информационные блоки, ее составляющие, а также методическую основу поисковых работ, спроектировать те направления научно-исследовательских работ, которые помогут получить информацию для наполнения этих блоков, сформировать информационную структуру. Комплексная ГИАМ позволит определить условия формирования известного местонахождения и провести прогноз наличия еще не открытых местонахождений в исследуемой области верхней части геологического разреза.

Задачей для геофизических исследований являлось получение информации об особенностях пространственного залегания рыхлых толщ и их дифференциации по физическим признакам, идентификации последних с литологическими и палеопедологическими элементами. В конечном итоге были получены трехмерные цифровые модели геоархеологических структур на уровне точности, доступном для используемых методов, а также описание рельефа кровли подстилающих пород, несущих на себе и определяющих общие черты структурного строения верхней толщи с выявленными артефактами.

В соответствии с поставленной задачей был сформирован комплекс геофизических работ, включивший в себя в качестве основного метода исследования

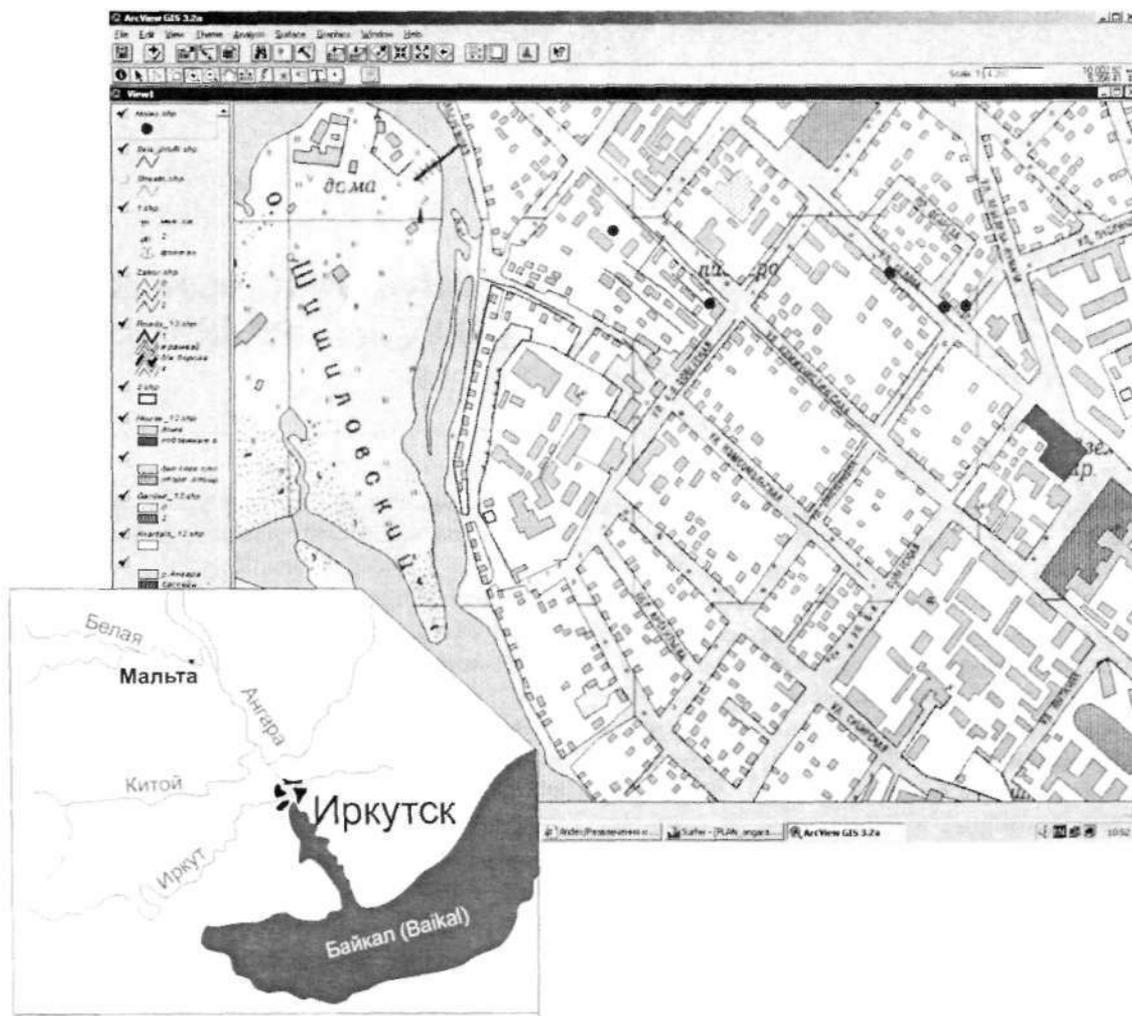


Рис. 1. Схема геофизических работ на участке мостового перехода через р. Ангара (линиями показаны сейсмические профили, точками – скважины, в которых проводились каротажные работы)

сейсморазведку (метод, применяющий возбуждение и регистрацию полей упругих волн) и электроразведку (использование как низкочастотного, так и высокочастотного электромагнитного поля). Выбор сейсморазведочного метода в варианте КМПВ (корреляционный метод преломленных волн) был продиктован тем, что в геологических изысканиях верхней части разреза он является наиболее эффективным при решении структурных задач и обладающим наибольшей точностью при определении положения границ изменения физических свойств среды (по плотности и акустической жесткости). Это обеспечивает необходимый уровень детальности при описании условий залегания рыхлых толщ. Кроме того, сейсморазведка позволяет получить достаточно плотную сеть точек наблюдения, которая является основой для построения трехмерной цифровой модели изучаемой среды. Однако по одному лишь физическому параметру (в данном случае - скорости распространения упругих колебаний) нельзя адекватно судить о структуре, не говоря уже о вещественном составе изучаемых литологических комплексов. С целью увеличения достоверности делаемых выводов при интерпретации данных привлекались и другие методы, в частности электроразведочные.

На участке мостового перехода через р. Ангара (правый берег) использовался метод ЕП (измерения интенсивности естественного электрического поля), позволяющий судить по распределению естественно возникающего электрического потенциала о фильтрационных процессах, протекающих в изучаемом разрезе. Фильтрационные характеристики, в свою очередь, позволяют сделать вывод о литологическом составе стратиграфических комплексов. На участке Мальтинского комплекса был использован метод, использующий искусственно возбуждаемое постоянное электрическое поле, с возможностью изменения глубины исследования разреза. Таких методов существует несколько, однако в нашем случае был выбран метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), зарекомендовавший себя при изучении верхней части геологического разреза (Огильви, 1997).

При условии идентификации границ, выделяемых по изменению физических характеристик с границами геологических тел разного состава, этими элементами можно аппроксимировать реальные геологические тела. Кроме наземных работ, на изучаемых объектах были пробурены скважины, в которых были измерены физические параметры горных пород (плотность, влажность, скорость распространения упругих колеба-

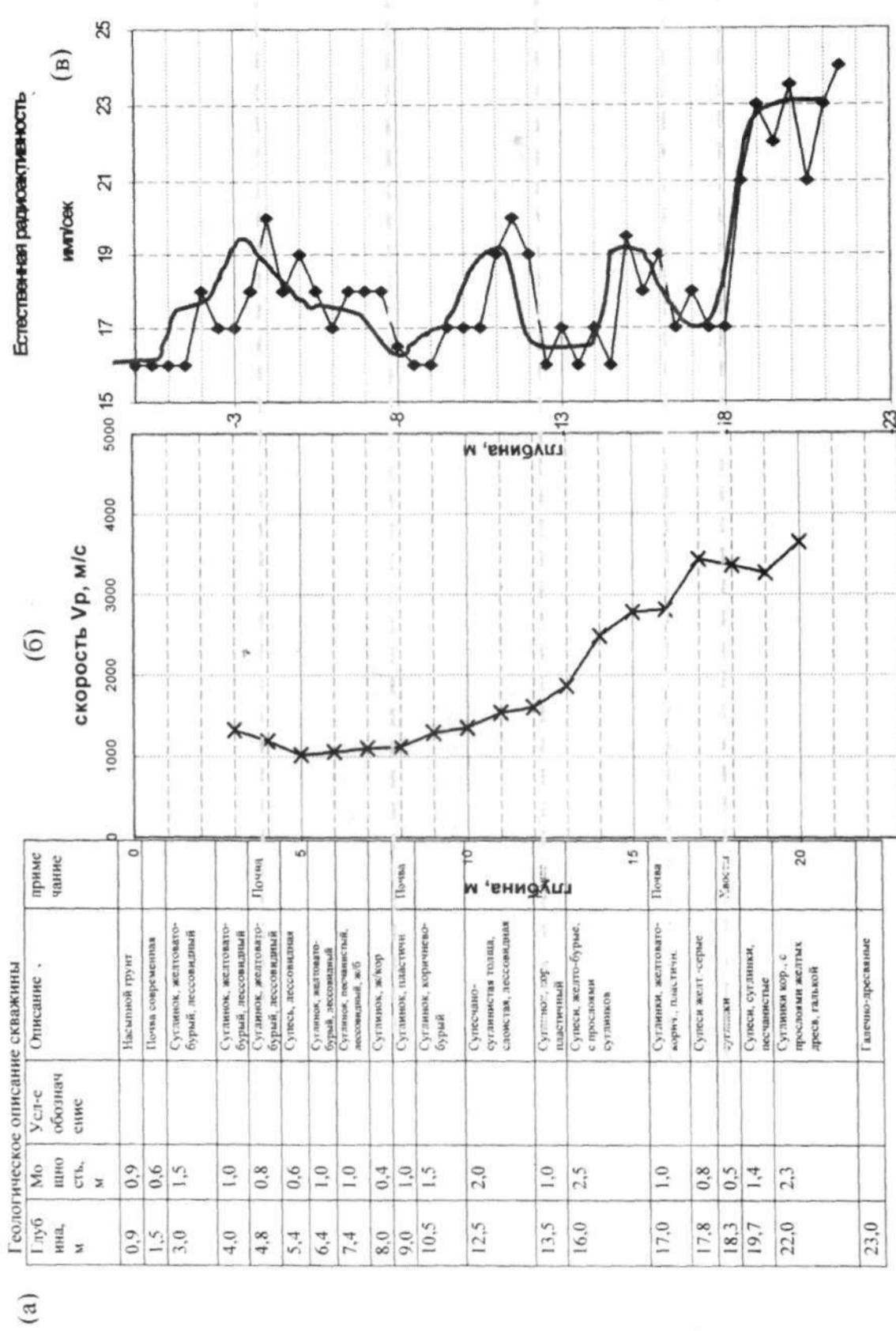


Рис. 2. Соответствие геологического описания скважины и геофизических характеристик (а) - колонка по скважине, (б) - распределение интервальных скоростей, (в) - распределение интенсивности естественного гамма-излучения

ний, естественная радиоактивность и др.). Эти параметры были приняты как расчетные характеристики для обеспечения необходимой точности при вычислении глубин залегания изучаемых объектов. При этом использовались метод микросейсмокаротажа (МСК), гамма-каротажа (ГК) и другие.

В геофизике точность метода и его разрешающая способность зависит от многих параметров, связанных как с производством собственно измерений, так и особенностями математической обработки и интерпретации полученных данных. Поэтому для описываемых работ был выбран стандартный подход и стандартная аппаратура, что обеспечило корректную оценку разрешающей способности методов и позволило определить дальнейшие перспективы развития их применимости в исследованиях четвертичных отложений с целью обеспечения потребностей геоархеологии. Геоинформационное моделирование предполагает широкое использование ГИС-технологий как на этапе сбора данных, так и на следующих шагах осмысления результатов, вплоть до их комплексного анализа.

В районе строительства мостового перехода на правом берегу р. Ангара (рис. 1) были проведены геофизические работы, комплекс которых включал некоторые из вышеперечисленных методов. Особенностью участка проведения работ было наличие интенсивных помех, связанных с его положением на одной из самых активных автомагистралей областного города. Поэтому методика полевых работ и дальнейшей интерпретации была модифицирована с учетом помех, возникающих в таких случаях (специализированные способы установки регистрирующих приборов, накопление слабых сигналов, специальные способы фильтрации, использование геоинформационных систем с учетом городских коммуникаций и топографии т.п.).

В разрезе по данным бурения и геофизики можно выделить верхнюю часть со скоростями распространения продольных волн 1000 м/с до глубин 10 - 12 м. Далее идет слой в интервале глубин от 12 до 14 м с постепенным повышением скорости в пределах 1100 - 2500 м/с. Ниже начинается чередование слоев с повышенными (до 4000-5000 м/с) и пониженными скоростями (до 2500-3500 м/с). После сглаживания графика интервальных скоростей становится заметно, что основной особенностью исследуемого разреза является постепенное повышение скорости от 800 до 4500-5000 м/с. При этом в разрезе присутствуют слои и с градиентным распределением скоростей и с постоянными (внутри слоя) скоростями.

Первый слой характеризуется скоростями распространения продольных волн от 280 до 400 м/с. При этом отмечается тенденция увеличения скоростей по направлению к набережной. Глубина залегания подошвы первого слоя изменяется от первого метра до 8-9 м. Этот слой представлен насыпным грунтом. Наибольшей мощности (до 9 м) этот слой достигает в районе пересечения улиц Коммунистическая и 4-я Советская, а также вдоль 4-й Советской.

Второй слой представляет собой сухие и маловлажные суглинки. Он характеризуется скоростями распространения упругих колебаний 500 - 1200 м/с. В районе квартала, ограниченного улицами Коммунистическая, 4-я Советская, Комсомольская и Верхняя Набережная, скорости особенно высоки и достигают 1000 и более м/с. Однако это может быть связано с повышенной влажностью суглинков в этом районе за счет как естественного влияния р. Ангара, так и за счет искусственного подтопления из канализационной системы. Глубина залегания подошвы этого слоя изменяется от 7 до 18 м.

Третий слой - это галечно-щебнистая, древесная порода с песчано-глинистым, карбонатным цементом. Он характеризуется скоростями распространения упругих колебаний от 1000 до 2000 м/с. Характер распределения скоростей сохраняется, однако в районе пересечения улиц Седова и 4-я Советская тоже отмечаются повышенные значения. Максимальные глубины залегания подошвы этого слоя составляют около 30(в).

Измерения естественной гамма-активности были сопоставлены с результатами МСК и данными, полученными при изучении керна скважин (рис 2). При сопоставлении сейсмического разреза с этими данными видно, что сейсмические границы, полученные по результатам наземных работ, очень хорошо увязываются не только с результатами микросейсмокаротажа, но и с участками резкого изменения естественной гамма-активности. Подошва первого слоя совпадает с участком резкого уменьшения гамма-активности. Кровля четвертого слоя совпадает с резким увеличением гамма-активности. Анализ графиков интервальных скоростей позволяет сделать вывод о том, что сейсмогеологический разрез участка является неоднородным. В верхней части сейсмогеологическая характеристика осложняется наличием таких специфических для нее явлений, как выветривание, изменение положения уровня грунтовых вод и т.п.

Сопоставляя результаты микросейсмокаротажа и гамма-каротажа (рис. 2б и 2в) с геологическим описанием разреза скважины (рис. 2а) можно сделать следующие выводы. Пониженными значениями естественной радиоактивности отмечаются интервалы с преобладанием суглинистого материала, особенно напротив прослоев «почв» и «хвостов». Такие прослои выделены на интервалах глубин 4.0-4.8 м, 8.0-9.0 м, 12.5-13.5 м, 17.0-17.8 м. Следует отметить, что на графике естественной радиоактивности эти участки занимают обычно больший интервал, нежели по геологическому описанию. Эти же слои, хотя и не так отчетливо, выделяются на графике интервальных скоростей (рис. 2б).

По результатам комплексной интерпретации построена геоинформационная модель геоархеологических объектов, одним из вариантов отображения которой является трехмерное представление границ между литолого-физическими объектами, составляющими верхнюю часть разреза (рис. 3).

Геофизические работы на втором объекте (Мальтийский комплекс) включали в себя наземные

электроразведочные и сейсморазведочные работы, а также проведение микросейсмокаротажа скважин (МСК). На каждом из участков выполнялись все эти виды работ, фактографическому отображению которых очень помогает использование ГИС-технологий (рис. 4). В результате первичной

интерпретации были построены геофизические разрезы, а также планы распределения физических свойств по площади изученных участков в соответствии с геологическим описанием Мальтийского комплекса местонахождений (Слагал, 1991).

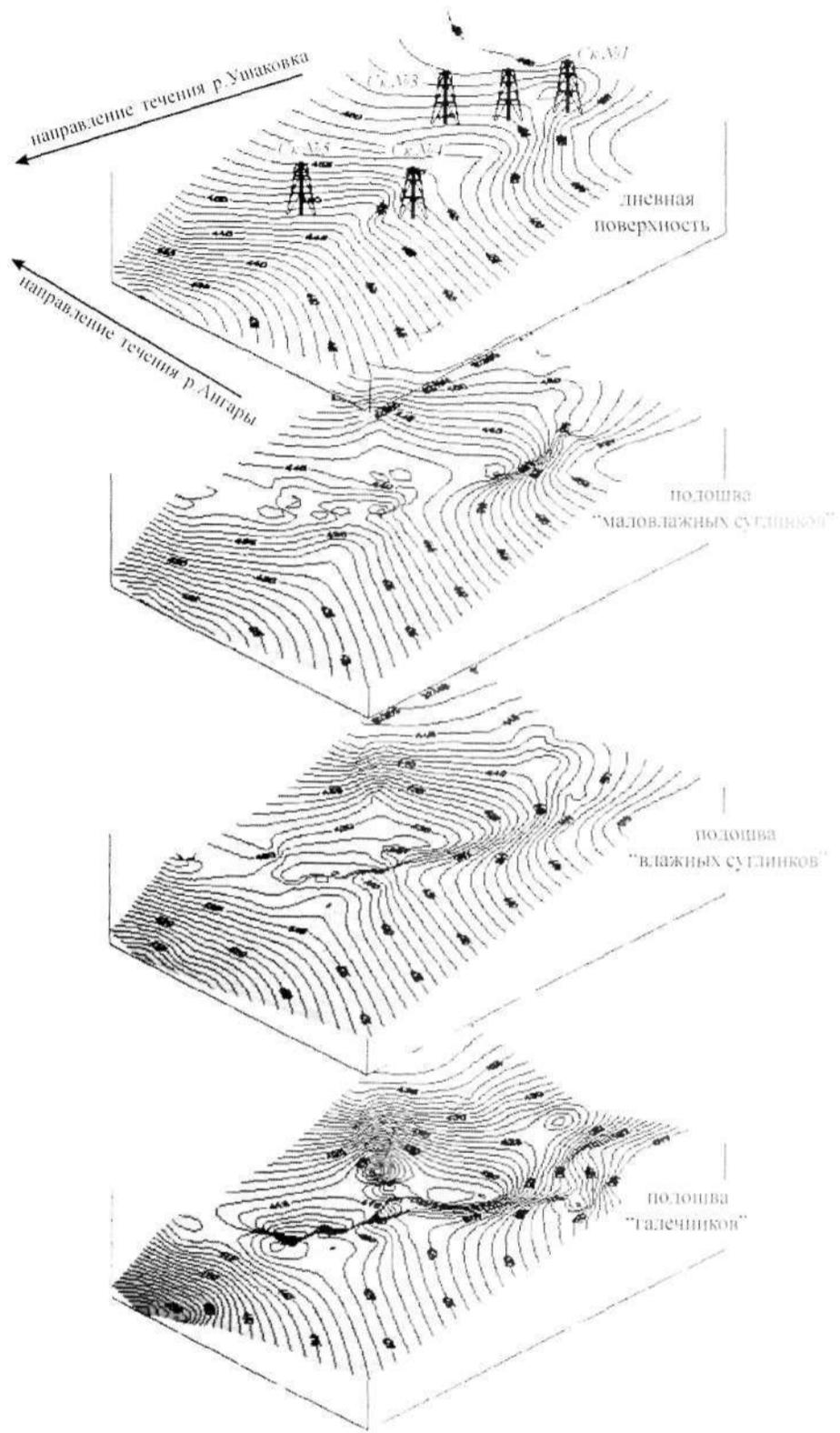


Рис. 3. Модель надземного рельефа правого берега р. Ангары (район мостового перехода) по геофизическим данным методом ШурТГУ (ЦЗК СО РАН, 2001).

и др., 2001), в геологическом строении выделяются слои (рис. 5).

Коренным цоколем территории Мальтийского комплекса являются серые доломиты ангарской свиты кембрия, смятые в полого волнистые складки, разбитые трещинами, разломами. Они слагают нижние части береговых обрывов р. Белой до отметок 406-416 м, в районе "Большой дюны"-413-414 м. В разрезах выделяются несколько слоев, имеющих субгоризонтальное залегание. При последующей более детальной интерпретации уже имеющихся данных можно более точно проследить выделенные горизонты. Первичные результаты обработки данных, полученных методами электро- и сейсморазведки (ВЭЗ и КМПВ), позволяют сделать вывод о наличии резкого изменения положения поверхности доломитов.

По результатам интерпретации геофизических данных в разрезе Мальтийского комплекса выделяется до 4-5 слоев. Опираясь на значения физических параметров (скорость распространения упругих колебаний, удельное кажущееся электрическое сопротивление и т.п.), можно привести следующий вариант привязки геофизического описания к литологическому:

- 1-й слой - современные почвы
- 2-й слой - рыхлые отложения четвертичного возраста, осложненные мерзлотой
- 3-й слой - кора выветривания сильно разрушенных доломитов
- 4-й и 5-й слои - доломиты разной степени выветрелости, в которых выделяются либо тектонические нарушения, либо карстовые образования,

залеченные процессами осадконакопления древней речной системой р. Белая и оползневыми процессами.

По результатам комплексной интерпретации построена геоинформационная модель геоархеологических объектов, одним из представлений которой является трехмерная модель выделенных границ между литологическими комплексами, выявленными по физическим свойствам (рис. 6).

Этап комплексных геоархеологических исследований в районе Соснового бора в 2000-2001 г. включал известную площадь раскопок в пределах "Большой дюны", в 10-15 м от берегового обрыва р.Белая, бурение скважины на расстоянии около 80м от берега, с полным отбором керна и детальную сейсмическую съемку по профилям. Объединение результатов геофизических, стратиграфических, литологических и геокриологических исследований при решении задач геоархеологии позволило определить структуру коренного ложа плейстоценовых песчаных отложений, восстановить этапы формирования палеорельефа, проявления криогенеза, а также обстановки осадконакопления в позднем плейстоцене. Анализ отложений и сопоставление разрезов позволили выделить некоторые этапы и особенности формирования поверхности, с которой связано многослойное местонахождение "Сосновый бор",

Геофизические работы включали в себя наземные электроразведочные и сейсморазведочные работы, а также проведение микросейсмокаротажа (МСК) скважин. На участке «Сосновый бор» были проведены сейсморазведочные работы по трем профилям, Основной профиль имеет северо-западное простира-

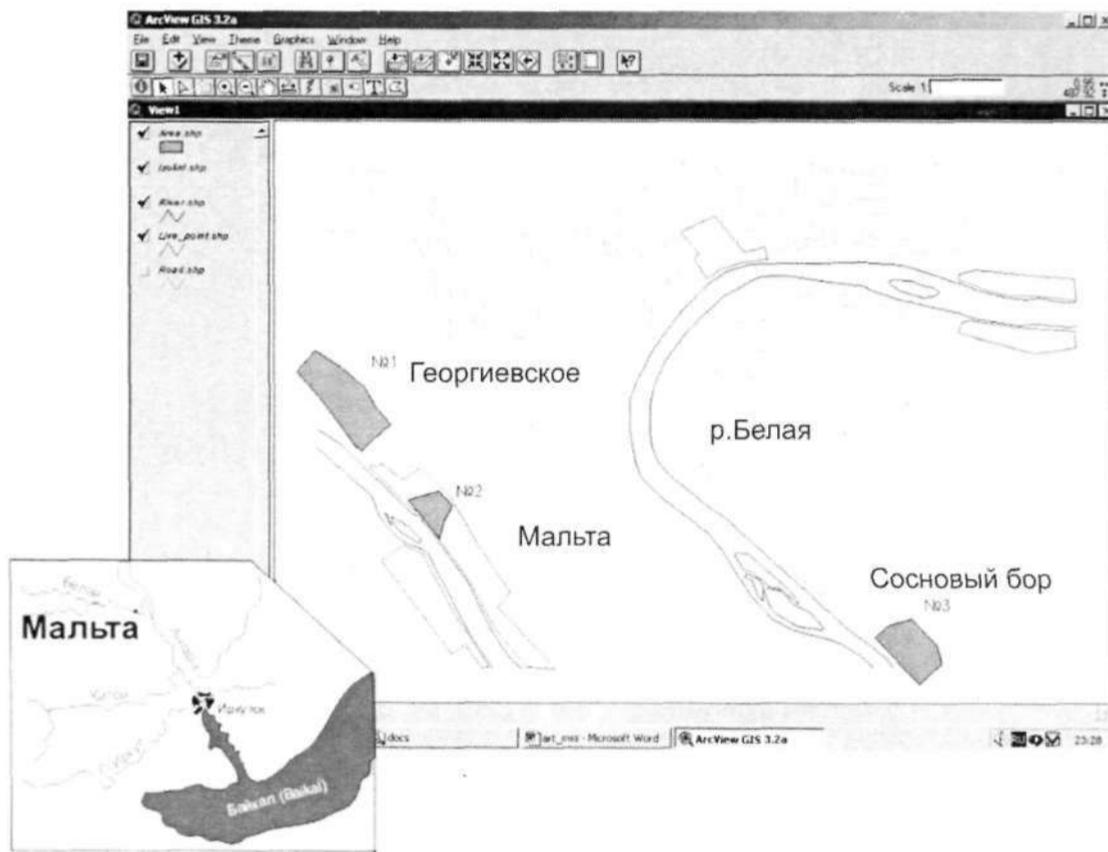


Рис. 4. Схема расположения участков геофизических работ на Мальтинском комплексе

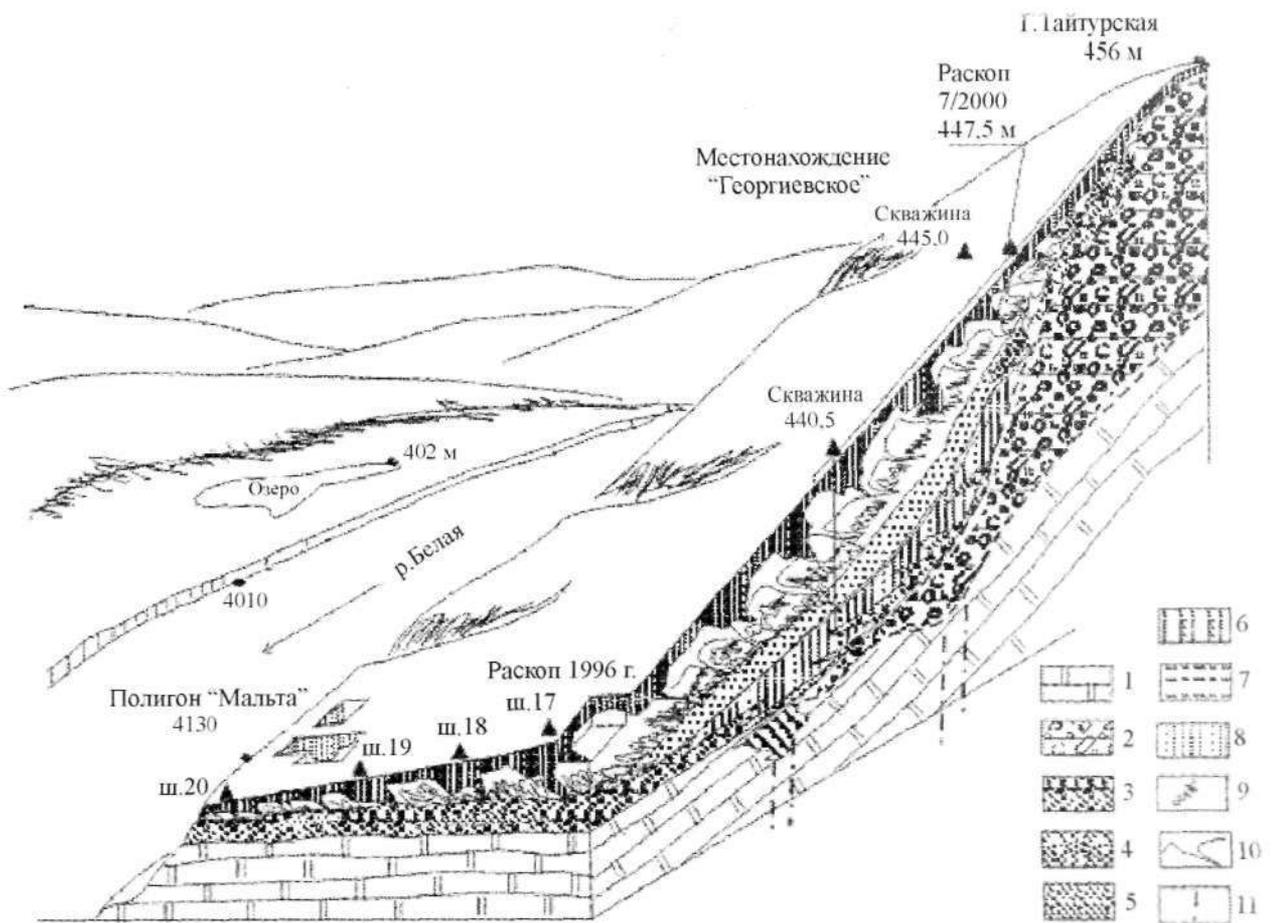


Рис. 5. Блок-диаграмма корреляции плейстоценовых отложений аккумулятивно-денудационного склона Мальтинской депрессии (по Слагоде Е.А., 2001): 1 - техногенная насыпь; 2 - почвы, корни растений; 3 - пески; 4 - заиленные пески, супеси; 5 - гальки, гравий; 6 - щебень, дресва; 7 - глинисто-кремнистые брекчии; 8 - песчаники, конгломераты; 9 - доломиты; 10 - грунтовые жилы

ние. а два других пересекают его под углом около 80° . Здесь же была пробурена скважина глубиной 8 м, где был выполнен микросейсмокартаж. Обработка данных наземной сейсморазведки производилась методом интервальных времен с помощью оригинального программного комплекса, в результате которой были получены сейсмогеологические разрезы, а также построены планы глубин залегания границ раздела между слоями с различными физическими характеристиками и распределения скоростей распространения упругих колебаний. На рис. 7 приведено сопоставление георазведочных и геофизических данных.

На участке Сосновый бор в разрезе выделяется до 5 границ, каждая из которых может быть увязана с каким-либо литологическим комплексом. На разрезах видно, что в юго-восточном направлении мощности слоев увеличиваются, а в меридиональном направлении почти не меняются. В целом проведенные работы показали высокую эффективность геофизических методов при решении задачи расчленения и прослеживания горизонтов в изучаемом разрезе и дают основание для рекомендации использования комплекса наземных сейсморазведочных методов и геофизических исследований скважин при решении подобного рода задач. По результатам геофизических исследований получены данные о сложном палеорельефе

цокольной поверхности. В плотных и трещиноватых доломитах прослеживается воронкообразная погребенная карстовая воронка глубиной до 8-13 м, размером 50x100 м, с асимметричным профилем, заполненная глинисто-кремнистыми брекчиями (рис. 8). На доломитах залегают глинисто-кремнистые брекчии доюрской коры выветривания, местами они смяты в складки и перекрыты песчаниками и конгломератами нижней юры, сохранившейся в 250 м юго-восточнее раскопа, в понижениях кровли доломитов и брекчий (расчистка Л/2000). Сейсмическими исследованиями глинисто-кремнистые брекчии, пески с галечным, щебнистым и каменными артефактами, как и конгломераты юры не расчленяются на отдельные слои в силу их частой изменчивости по латерали. Крутой перегиб погребенной поверхности северо-восточнее скважины и асимметрия карстовой воронки могут быть связаны с останцами выветрелых конгломератов нижней юры, аналогичных расчистке Л/2000 и с блоковым смещением поверхности по разломам.

Археологические артефакты так называемого «коррадированного комплекса», как и ранее, вызывают большой интерес и с морфо-технологических позиций, и с точки зрения условий залегания. В раскопе 2001 г. коррадированные изделия из кремня и кварцита, как и

прежде, отмечены в горизонте, совпадающем с литологическим слоем 6 описания, данного в настоящей статье. Слой представлен дресвянисто-щебнистыми песками, рассеченными сетью относительно глубоких трещин, заполненных серым песком.

По данным сейсмических исследований хорошо различаются заиленные пески, супеси слоев 3, 4, 5, отличающиеся повышенной влажностью от перекрывающих песчаных сухих слоев 1,2. Кровля слоев 3-5 образует холмисто-западинный палеорельеф, причем западина, расположенная над погребенной карстовой

воронкой, не имеет связи с долиной р. Белая. Отсутствие выраженных линейных направлений форм погребенного рельефа, в отличие от современной поверхности, вероятно, связано с изменчивостью направлений ветров, формировавших эолово-делювиальную пачку слоев 3,4,5.

По последовательности залегания и набору различных горизонтов плейстоцена в разрезах местонахождения "Сосновый бор" намечается следующая последовательность событий. Образованию плейстоценовых отложений предшествовал

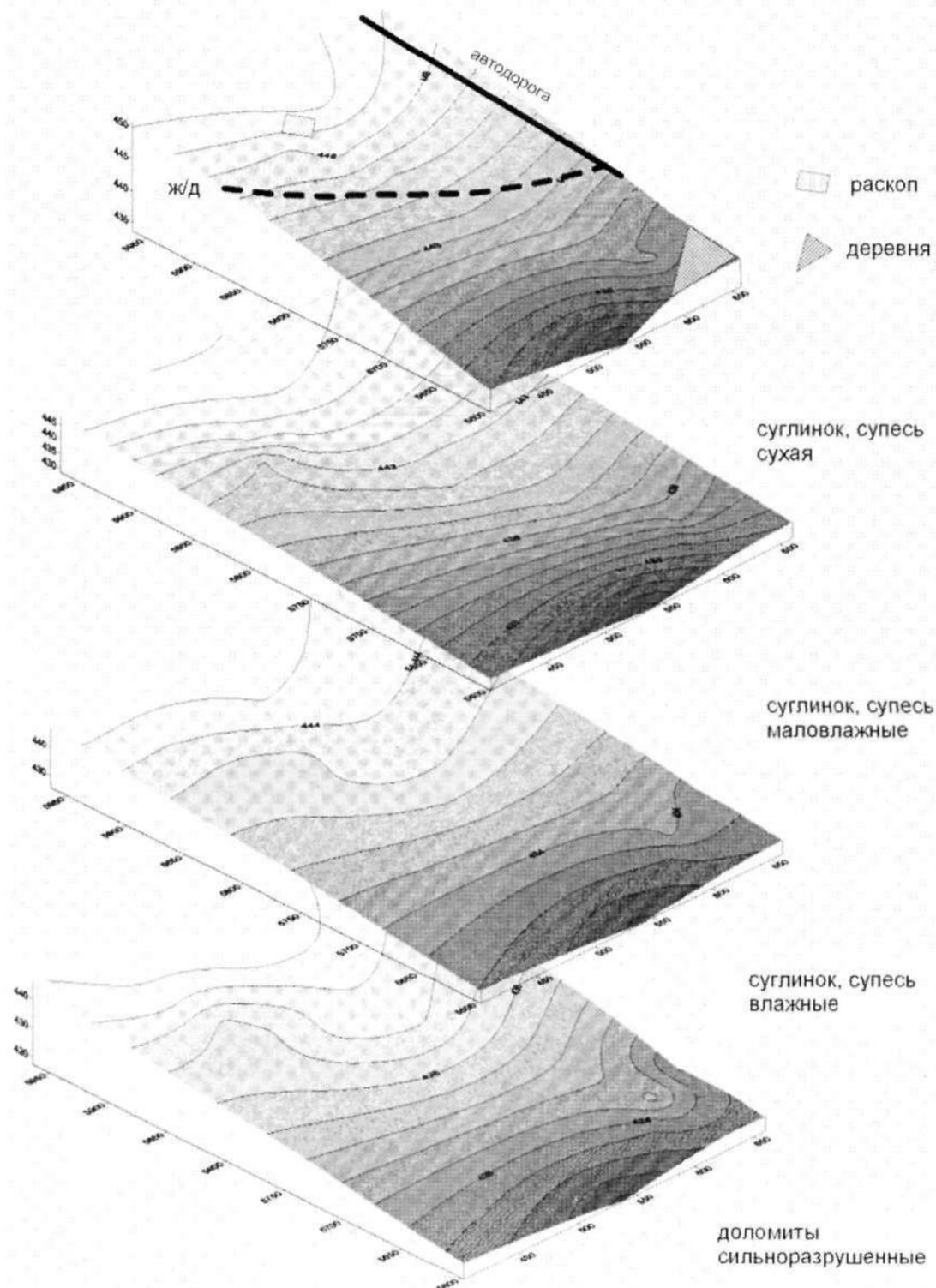


Рис. 6. Сейсмолитологическая модель местонахождения Георгиевское. ИргТУ, 2001

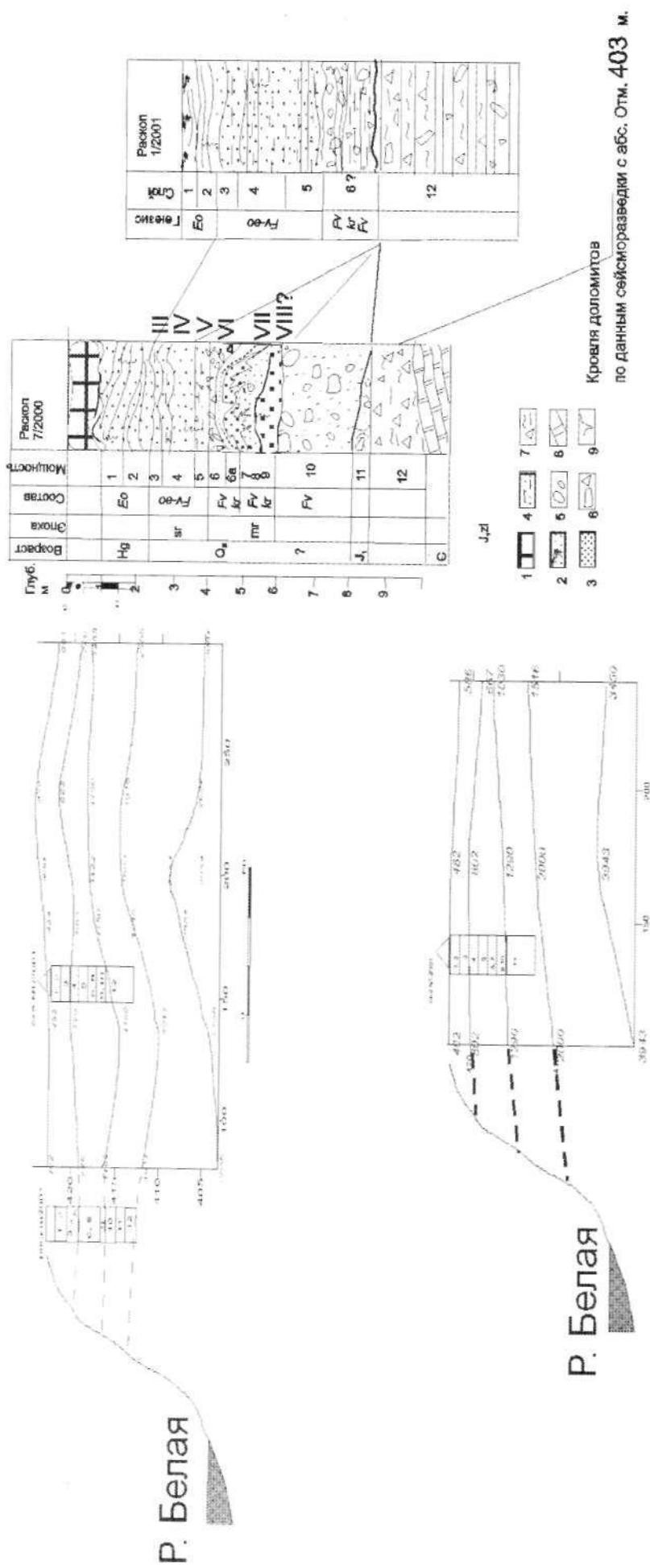


Рис. 7. Геолого-геофизическая корреляция отложений местонахождения Сосновый бор:

1 – техногенная насыпь; 2 – почвы, корни растений; 3 – пески; 4 – заиленные пески, супеси; 5 – гальки, гравий; 6 – щебень, дресва; 7 – глинисто-кремнистые брекчии; 8 – песчанки, конгломераты; 9 – доломиты; 10 – грунтовые жапы

глубокий размыв юрских пород, мел-палеогеновых кор выветривания и продуктов их переотложения - доплейстоценовый этап выравнивания.

Накопление песчаных галечников слоя 10 временными интенсивными потоками с ближайших останцов нижней юры - с бортов депрессии к ее центру, при этом наиболее крупные обломки могли оставаться на месте размыва и перемешиваться с принесенным

песчаным и мелким обломочным материала. Поверхность слоя осушалась.

Накопление песчаных отложений слоя 9 временными потоками средней интенсивности сопровождалось частым возникновением субаэральных условий, без прямых признаков синхронного промерзания и, вероятно, завершалось развитием почв, болотных накоплений, впоследствии размытых. Накопление слоя 8

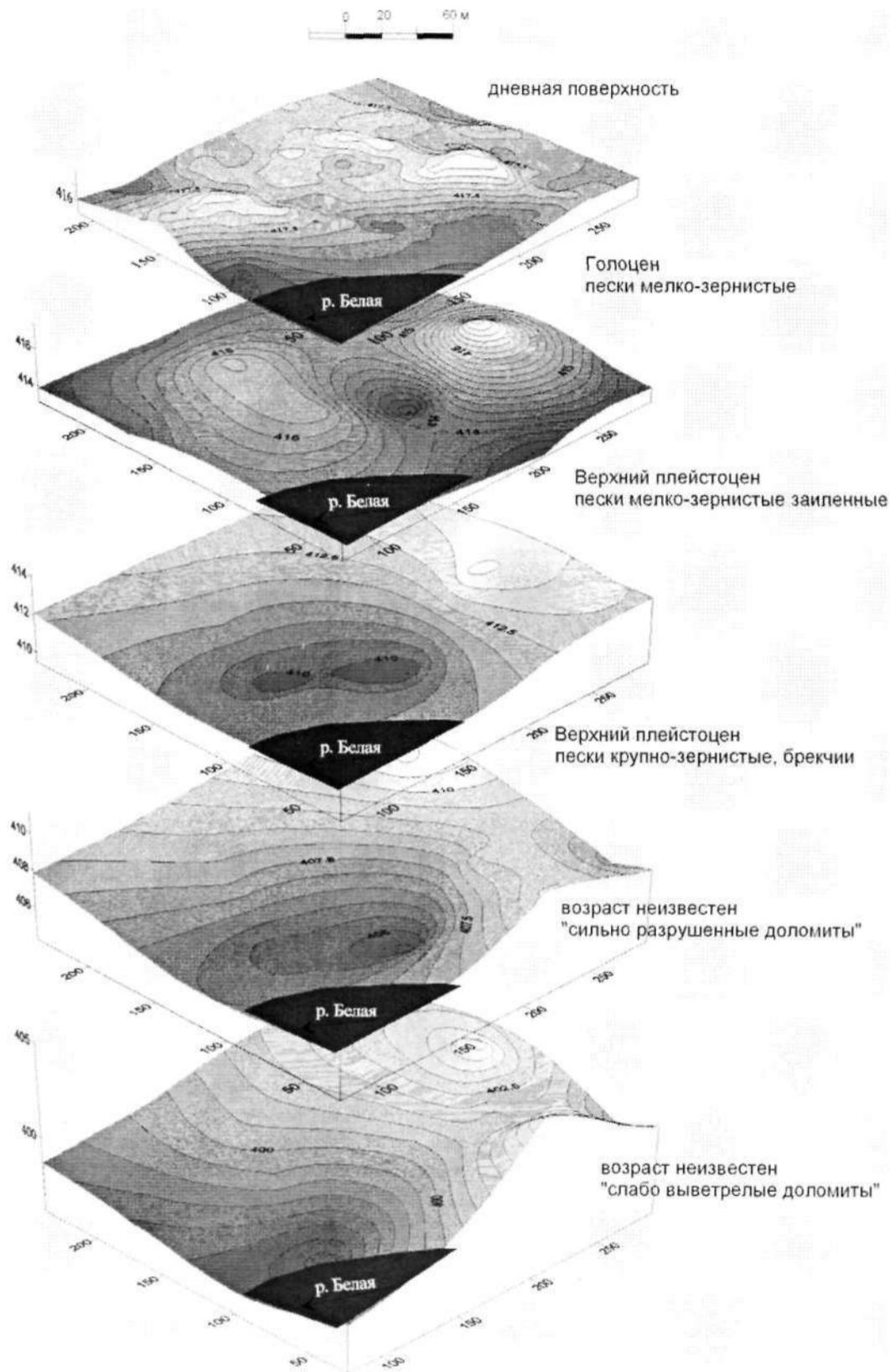


Рис. 8. Модель сейсмолитологических границ, Участок Сосновый бор, ИрГТУ, 2002

временными периодическими потоками низкой интенсивности в субэвразальной увлажненной обстановке на фоне сингенетического промерзания осадков.

Образование жил слоя 7 - субэвразальная холодная и влажная обстановка с сингенетическим промерзанием осадков и растрескиванием поверхности, происходило в раннемуруктинское время. Оттаивание мерзлоты, образование термокарстовых понижений, размыв кровли слоев 7,8, вероятно происходило в среднемуруктинское время.

Образование слоя 6 эпигенетических жил, внедрявшихся в талые уплотненные отложения с размытой кровли слоев 7,8 происходило в позднемуруктинское время. Оттаивание и образование термокарстовых понижений, вероятно происходило в каргинко-раннесартанское время, ему предшествовал этап активной коррозии кремнистого материала и артефактов.

Палеоложбина перекрыта дюнами слоев 1,2, дефляционно-делювиальными песками слоев 3-5 и каргинско-нижнесартанскими отложениями слоя 6. На бортах палеоложины, в береговых раскопах под эрозионным срезом сохранились верхнемуруктинские образования слоя 6а, в наиболее глубокой ее части смыты все подстилающие, она слабо врезана в глинисто-кремнистые брекчии. Глубокие части ложбины пространственно тяготеют к погребенной карстовой воронке, вероятно, влиявшей на заложение и направление стока вод. Судя по различию строения бортов и днища, врез палеоложины происходил в ранне-сартанский после завершения образования термокарстовых понижений. Заполнение ложбины происходило в течение всего сартанского периода. Палеоложбина является реликтом поверхности, существовавшей до прорыва эрозионно-тектонического русла Белой, ее сток не был связан с современным руслом и направлен в сторону максимально-погруженных участков Мальтийской впадины, локальной депрессии, отделенной зоной относительных поднятий или слабых опусканий.

Литература

Генералов А.Г., Емельянов А.И., Мироманов А.В., Ошепкова Е.Б., Слагода Е.А. Геоинформационные технологии как инструмент изучения строения и закономерностей залегания плиоцен-плейстоценовых толщ. Современные проблемы Евразийского палеолитоведения: Сборник докладов международного

археологического симпозиума. - Новосибирск: Изд-во Института археологии и этнографии СО РАН, 2001. - С.83-94.

Медведев Г.И., Воробьева Г.А. "К проблеме группировки геоархеологических объектов Байкало-Енисейской Сибири" // Палеоэкология плейстоцена и культуры каменного века Северной Азии и сопредельных территорий. - Новосибирск: Изд-во Института археологии и этнографии, 1998, Т.2. - С. 148-159.

Ошепкова Е.Б., Слагода Е.А. Фациально-генетическая характеристика плейстоценовых отложений придолинных склонов на территории г. Иркутска/ Современные проблемы Евразийского палеолитоведения. Сборник докладов международного археологического симпозиума. - Новосибирск: изд-во Института археологии и этнографии СО РАН, 2001. - с.294-300.

Роговской Е.О., Козырев А.С., Латышев Н.А., Медведев Г.И. Георгиевское 1 - геостратиграфия, возраст, техноморфология. /Современные проблемы Евразийского палеолитоведения. Сборник докладов международного археологического симпозиума. - Новосибирск: изд-во Института археологии и этнографии СО РАН, 2001. - с.324-330.

Огильви В.В. Методы инженерной геофизики. - М.: Недра, 1997.

Summary

The authors in this article present the principles and results of using of the geophysical methods in research of the different archaeological goals. The one of them is the reconstruction of environment of the modification of archaeological location (site). We also realize often the necessity of the prognosis of archaeological material in researched location. For these purposes researches use the collection, preliminary processing and analysis of the data by the GIS-technologies which consist of implements and program means. The first one (implements) include the geodesic tools for obtaining the coordinates of observation and the special measuring instruments, etc. The program means include such a common supplement as the MS Office, some graphic redactors and also special programs like a GIS. These program means allow to make and accompany the geoinformational models of the researched locations giving the possibility for analysis of the obtained data automatically.