



МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ ПО ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ
И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ (МАИГ, IAEG)

Публикация № 1 комиссии МАИГ 25

Руководство по разработке и применению инженерно-геологических моделей для проектов

Версия 2 от 9 августа 2024 г. (IAEG C25 EGM v2.0, 9 August 2024)

Основные авторы

Фред Бейнс и Стив Пэрри (Fred Baynes, Steve Parry)

Главные редакторы

Мартин Калшоу и Джим Гриффитс (Martin Culshaw, Jim Griffiths)

Принимавшие участие авторы и редакторы

Уэйн Барнетт, Хорхе Бежеман, Энтони Боуден, Ричард Брехо, Джо Кант, Тревор Картер, Дафидд Чендлер, Роберто Краверо, Мартин Калшоу, Антонио Дематтейс, Йогендра Дева, Диего Дикурцио, Дэвид Добсон, Цзя Юн Донг, Марк Эггерс, Питер Фэйр, Робин Фелл, Фил Флент, Эндрю Форсайт, Мартин Гриффин, Джим Гриффитс, Билл Ханеберг, Низам Хасан, Крис Джек, Грэм Джардин, Стратис Карантанеллис, Алики Коккала, Кристоф Краус, Теему Линдквист, Роберт Маккин, Василис Маринос, Стюарт Миллис, Тим Нэш, Джудит Натанайл, Пол Натанайл, Саймон Нелис, Алисия Ньютон, Ян Новотны, Даррен Пол, Алистер Шофилд, Дэвид Шилстон, Ян Шипуэй, Дуг Стед, Кит Тернер, Джованна Вессия, Дэвид Уоринг, Фелиция Вейр, Энн Уильямс, Эрик Вундер [Wayne Barnett, Jorge Bejeman, Anthony Bowden, Richard Brehaut, Joe Cant, Trevor Carter, Dafydd Chandler, Roberto Cravero, Martin Culshaw, Antonio Dematteis, Yogendra Deva, Diego Dicurzio, David Dobson, Jia-Jyun Dong, Mark Eggers, Peter Fair, Robin Fell, Phil Flentje, Andrew Forsythe, Martin Griffin, Jim Griffiths, Bill Haneberg, Nizam Hasan, Chris Jack, Graeme Jardine, Stratis Karantanellis, Alik Kokkala, Christoph Kraus, Teemu Lindqvist, Robert MacKean, Vassilis Marinos, Stuart Millis, Tim Nash, Judith Nathanail, Paul Nathanail, Simon Nelis, Alicia Newton, Jan Novotny, Darren Paul, Alistair Schofield, David Shilston, Ian Shipway, Doug Stead, Keith Turner, Giovanna Vessia, David Waring, Felicia Weir, Ann Williams, Erik Wunder]

Ссылка для цитирования

Baynes, F.J. and Parry, S. 2024. Guidelines for the development and application of engineering geological models on projects. Version 2.0. International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) Commission 25 Publication No. 1, 81 p.

Можно загрузить по адресу

<https://www.iaeg.info/C25EGMGuidelines/>

Авторские права принадлежат МАИГ, за исключением некоторых рисунков, которые были впервые опубликованы другими лицами. Запрещается копировать, адаптировать, переводить эту публикацию без предварительного разрешения, которое можно получить, связавшись с генеральным секретарем МАИГ по адресу iaegsg@163.com. Можно цитировать выдержки разумного объема без предварительного разрешения при условии полной ссылки на их источник



МАИГ

Разработка ИГМ и их применение, 9 августа 2024 г.

Руководство по разработке и применению инженерно-геологических моделей для проектов

Версия 2 от 9 августа 2024 г. (IAEG C25 EGM v2.0, 9 August 2024)

Документ подготовлен рабочей группой комиссии С 25 МАИГ

Версия	Дата	Статус	Подготовили
IAEG C25 EGM Guidelines v1.0.pdf	14.12.2022	Руководство и примеры, версия 1 (Guidelines & Examples v1.0)	Фред Бейнс, Стив Пэрри (Fred Baynes, Steve Parry)
IAEG C25 EGM Guidelines v2.0.pdf	09.08.2024	Руководство, версия 2 (Guidelines v2.0)	Фред Бейнс, Стив Пэрри (Fred Baynes, Steve Parry)

МАИГ, авторы, редакторы и другие участники подготовки данного руководства не делают никаких заявлений относительно полноты, пригодности или полезности представленной в нем информации. Те, кто использует рекомендации из этого документа, сами несут ответственность за принятие собственных решений на их основе.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	1
История вопроса	2
1. РЕКОМЕНДАЦИИ	3
1.1. ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ ИГМ	4
1.1.1. Определения	4
1.1.2. основополагающие принципы	5
1.2. ПРОЦЕСС РАЗРАБОТКИ ИГМ	9
1.2.1. общее представление о процессе разработки	9
1.2.2. Выбор уровня разработки ИГМ	10
1.2.3. Детали процесса разработки	10
1.2.4. ИГМ и Еврокод	20
1.3. КОМПОНОВКА И ПЕРЕДАЧА ИГМ	21
1.3.1. Введение	21
1.3.2. Краткое описание документации по компонентам ИГМ	21
1.3.3. Значение для контракта на проектирование	22
1.3.4. Представление отчета по ИГМ	22
1.3.5. Создание и визуализация цифровой 3D-модели	25
1.4. УПРАВЛЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯМИ ИГМ	29
1.4.1. Введение	29
1.4.2. Источники неопределенностей	29
1.4.3. Комплексная оценка надежности ИГМ путем ее проверки и анализа	29
1.4.4. Другие методы оценки неопределенностей и надежности ИГМ	30
1.5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ИГМ	32
1.5.1. Проверка качества процесса разработки ИГМ	32
2. КОММЕНТАРИИ	33
2.1. ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ ИГМ	34
2.1.1. Определения	34
2.1.2. основополагающие принципы	34
2.2. ПРОЦЕСС РАЗРАБОТКИ ИГМ	35
2.2.1. общее представление о процессе разработки	35
2.2.2. Выбор уровня разработки ИГМ	40

2.2.3. Детали процесса разработки	40
2.2.4. ИГМ и Еврокод	52
2.3. КОМПОНОВКА И ПЕРЕДАЧА ИГМ	53
2.3.1. Введение	53
2.3.2. Краткое описание документации по компонентам ИГМ	53
2.3.3. Значение для контракта на проектирование	53
2.3.4. Представление отчета по ИГМ	53
2.3.5. Создание и визуализация цифровой 3D-модели	58
2.4. УПРАВЛЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯМИ ИГМ	68
2.4.1. Введение	68
2.4.2. Источники неопределенностей	69
2.4.3. Комплексная оценка надежности ИГМ путем ее проверки и анализа	71
2.4.4. Другие методы оценки неопределенностей и надежности ИГМ	72
2.5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ИГМ	77
2.5.1. Общие цели ИГМ в области качества	77
2.5.2. Проверка качества процесса разработки ИГМ	77
2.6. ИГМ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ	80
2.6.1. Общая информация	80
2.6.2. Общее представление о развитии ИГМ на разных этапах проекта	80
2.6.3. ИГМ при инженерных изысканиях	81
2.6.4. ИГМ при управлении строительством	82
2.7. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	85
ПРИЛОЖЕНИЕ. УЧАСТНИКИ ПОДГОТОВКИ РУКОВОДСТВА	89

Руководство по разработке и применению инженерно-геологических моделей для проектов

Версия 2 от 9 августа 2024 г. (IAEG C25 EGM v2.0, 9 August 2024)

ВВЕДЕНИЕ

Цель данного руководства – представить краткие, практичные, доступные и авторитетные рекомендации по эффективному использованию инженерно-геологических моделей для широкого практического применения, в том числе в гражданском строительстве, горнодобывающей промышленности, при исследованиях геологических опасностей, исследованиях шельфа, планировании землепользования, экологических оценках. Это руководство широкого спектра, предназначенное для использования (или ссылок) заинтересованными сторонами для проектов всех масштабов, которые имеют дело с грунтами на практике или в теории, во всем мире.

Инженерно-геологическая модель (ИГМ) отражает комплексную систему знаний для интерпретации и оценки инженерно-геологических условий, позволяет оценивать взаимодействие предлагаемого проекта с этими условиями, давая возможность принимать соответствующие инженерные решения на протяжении всего жизненного цикла проекта (с самого начала и до вывода объекта из эксплуатации). Цель принятия этого определения – выход за рамки концепции, согласно которой «модель» является упрощенным и статичным трехмерным представлением грунтовых условий, и признание того, что формирование и развитие ИГМ представляет собой непрерывный процесс накопления знаний, который обеспечивает направление и контроль всего, что связано с геотехникой, на протяжении всего жизненного цикла проекта.

Это руководство было разработано для того, чтобы дать практикам рекомендации по «ИГМ-подходу», включая методы цифрового трехмерного моделирования, а также чтобы дать информацию консультантам, заказчикам, владельцам, государственным и регулирующим органам по использованию ИГМ для проектов.

Руководство было разработано членами комиссии МАИГ по использованию инженерно-геологических моделей C25 (IAEG C25) и отражает консенсусные мнения участников подготовки этого документа. Предполагается, что оно будет переведено на другие языки для распространения в сообществе геотехников на международном уровне. Оно будет продолжать пересматриваться и корректироваться в ответ на отзывы по его использованию в различных частях мира.

В данное руководство входят следующие две части.

Первая часть включает рекомендации по разработке ИГМ – о том, как следует разрабатывать подходящую ИГМ для любого проекта, который имеет отношение к взаимодействиям с грунтовой средой.

Вторая часть включает комментарии к рекомендациям, приведенным в предыдущей части, – дополнительную вспомогательную информацию, если она необходима, к каждой рекомендации (для удобства использования – с той же нумерацией). Там, где это важно, приводятся гипертекстовые ссылки.

Следует также отметить следующее.

1. Цель настоящего руководства – предоставить информацию и помочь в принятии решений. Но оно не предназначено для определения стандартов работы.
2. Данное руководство не следует толковать как предписывающее ход действий или процедуру построения ИГМ, поскольку могут существовать различия в подходах и методах учета конкретных инженерно-геологических и проектных задач.

История вопроса

Использование «моделей» в инженерной геологии обсуждалось Зарубой и Менклом (Zaruba, Mencl, 1954, на чешском языке) и Моргенштерном и Круденом (Morgenstern, Cruden, 1977), хотя, возможно, первой инженерно-геологической моделью было создание разреза грунтового массива для иллюстрации геологических условий строительного проекта. Примером может служить работа Уильяма Смита (William Smith) и разработка геологических карт и разрезов, связанных со строительством канала в Великобритании в XVIII веке. Фукс (Fookes, 1997) донес идею моделей в инженерной геологии до более широкой аудитории, но назвал их просто «геологическими моделями». Фукс и др. (Fookes et al., 2000) усовершенствовали этот подход, включив в него концепцию «общей геологической истории», то есть того, что инженерно-геологические характеристики грунтовой среды являются результатом всей геологической и геоморфологической истории соответствующей территории. Книлл (Knill, 2003) предположил, что «геологическая модель» сама по себе не подходит для строительных целей, поскольку она недостаточно точно определяет инженерно-геологические условия естественной грунтовой среды или недостаточно помогает реализовать проект. Он предположил, что было бы полезнее подумать о геологических моделях, моделях грунтовой среды и геотехнических моделях, причем тип модели должен быть связан с ходом развития проекта. Бок и др. (Bock et al., 2004) представили перспективу взаимосвязи между инженерной геологией, механикой дисперсных грунтов, механикой скальных грунтов, областями интересов соответствующих международных научных обществ, характером геологических моделей и моделей грунтовой среды.

Комиссия МАИГ C25 опубликовала промежуточный отчет (Parry et al., 2014), в котором определила модель как «приближение к реальности, созданное с целью решения проблемы», обрисовала путь разработки инженерно-геологических моделей, разграничила концептуальную и наблюдательную составляющие этого процесса и привела примеры. Этот подход был принят в недавних руководствах, например в руководстве для ледниковых и перигляциальных ландшафтов, представленном в специальных публикациях по инженерной геологии Геологического общества (например, The Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication, 28, for glacial and periglacial terrains, Giles et al., 2017). Однако ИГМ-подход еще не был включен в национальные и международные стандарты.

Бейнс и др. (Baynes et al., 2021) подробно остановились на промежуточном отчете комиссии C25 и подчеркнули, что ИГМ – это система знаний, которая может быть использована для понимания и передачи всего, что известно о геологических и связанных с ними инженерно-геологических условиях, на любом этапе жизненного цикла проекта.

Настоящее руководство было разработано членами комиссии МАИГ по использованию инженерно-геологических моделей C25 (IAEG C25) после 12-й Азиатской региональной конференции МАИГ в 2019 году в г. Чеджу в Южной Корее. Первый проект руководства был представлен на 3-й Европейской региональной конференции МАИГ в Афинах в октябре 2021 года.

Первая версия руководства (IAEG C25 EGM Guidelines version 1.0) стала доступной для свободного скачивания в формате PDF на веб-сайте МАИГ с 14 декабря 2022 года.

В 2024 году руководство было пересмотрено в ответ на полученные замечания. И были удалены примеры, которые были включены в первую версию. Однако некоторые цифры из примеров остались в части 2 «Комментарии».

Авторы руководства и их страны перечислены в приложении.

1. РЕКОМЕНДАЦИИ

1.1. ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ ИГМ

1.1.1. Определения

Важные термины, используемые в настоящем руководстве, определены здесь (некоторые другие термины определены там, где они встречаются в тексте).

- *Модель* – приближение к реальности, созданное с целью решения какой-либо проблемы.
- *Инженерная геология* – применение геологических, геоморфологических и гидрогеологических знаний для строительства.
- *Инженерно-геологическая модель (ИГМ)* – комплексная система знаний, позволяющая логически оценивать и интерпретировать геологические, геоморфологические и гидрогеологические условия, которые могут повлиять на проект и его технические характеристики. ИГМ имеет как концептуальную, так и наблюдательную составляющие и может включать ряд взаимосвязанных моделей и подходов. Геологическая модель, геотехническая модель и оценка геологических опасностей являются результатами построения (выходными данными) системы знаний ИГМ.
- *Концептуальная модель* – модель, основанная главным образом на инженерно-геологических концепциях и интерпретациях, а также на знании того, что определенные инженерно-геологические условия и процессы, вероятно, будут иметь определенные инженерно-геологические характеристики. Временная концептуальная модель (иногда называемая эволюционной моделью) иллюстрирует, как грунтовые условия могли изменяться и в недавнем прошлом, и в масштабе геологического времени.
- *Наблюдательная модель* – модель, основанная главным образом на инженерно-геологических наблюдениях и измерениях, в пространстве 3D-данных (XYZ) или в пространстве 4D-данных (XYZ плюс время). Наблюдательные модели все чаще разрабатываются в цифровой среде.
- *Инженерно-геологические элементы* – объемы грунта со схожей геологической историей и схожими инженерно-геологическими характеристиками, выделяемые в процессе проектирования.
- *Инженерно-геологическое картирование* – подготовка карты, отображающей распределение и границы инженерно-геологических элементов, геологические структуры, геоморфологические и гидрогеологические условия, имеющие значение для проекта, с использованием соответствующей символики, выполненной в том масштабе и с тем уровнем детализации, которые определены целью картирования (от региональной оценки ресурсов до подтверждения грунтовых условий основания).
- *Геологическая модель* – результат разработки системы знаний ИГМ, в котором задокументировано распределение в 3D-пространстве инженерно-геологических элементов, гидрогеологических условий и геолого-геоморфологических процессов.
- *Геотехническая модель* – результат разработки системы знаний ИГМ, в котором представлены инженерные характеристики и/или геотехнические параметры соответствующих аспектов геологической модели.
- *Аналитическая модель* – упрощенная геологическая модель и/или геотехническая модель, разработанная с целью инженерных оценок, анализа или проектирования.
- *Цифровая модель* – сопоставление и представление данных в компьютерной среде, позволяющее визуализировать, интерпретировать и помогать в передаче информации (поддержании связи) между частями ИГМ, все чаще разрабатываемое в 3D.

- *Цифровая визуализация* – результат разработки цифровой модели, обычно графическое изображение выбранных частей данных в формате 2D или 3D.
- *Модель грунтовой среды* – тип модели, часто требуемый контрактами или стандартами для обобщенного представления грунтовых и гидрогеологических условий площадки в определенный момент времени. Она может включать геотехнические параметры для различных ее элементов. Значение этого термина в различных сводах правил и стандартах различно.
- *Геологические опасности (геоопасности)* – геологические и геоморфологические процессы или явления, которые могут оказать неблагоприятное воздействие на проект (например, развитие карста, оползни, подземная добыча полезных ископаемых, подземный газ, сейсмическая активность и т.д.).
- *Проект* – цель, для которой разрабатывается ИГМ. Инженерно-геологические модели обычно используются для оценки реакций грунта на строительный проект, но они также применяются и более широко, например для оценок природных ресурсов, региональных геологических опасностей и т.д.

1.1.2. Основополагающие принципы

1.1.2.1. ИГМ оценивает взаимодействия между проектом и грунтовой средой

Цель ИГМ – оценка реакции грунтовой среды на изменения, обычно включающая рассмотрение возможных взаимодействий между проектом и грунтом. Эффективная ИГМ должна прогнозировать ожидаемые грунтовые условия и возможные реакции основания на реализацию проекта.

1.1.2.2. Система знаний ИГМ

Система знаний ИГМ представляет собой понимание геологических, геоморфологических и гидрогеологических условий, которые имеют инженерное значение для проекта и которые могут быть использованы для решения инженерных задач (рис. 1-1). ИГМ – это не одна «модель», а несколько динамических моделей, а также хранилище лежащих в их основе данных (если последние не включены в сами модели), вспомогательной документации (например, отчетов об обследовании объекта) и структуры знаний, объединяющей эти компоненты. В той мере, в какой это осуществимо и практически целесообразно, ИГМ должна быть: основанной на всех доступных и относящихся к делу знаниях; логически построенной в соответствии с принципами, установленными в настоящем руководстве; сосредоточенной на соответствующих геологических, геоморфологических и гидрогеологических условиях и инженерных характеристиках, имеющих значение для проекта; четко и понятно представленной, удобной для передачи и использования.

Три основных результата создания ИГМ, нужных для проекта, – это геологическая модель, геотехническая модель и оценка геологических опасностей.

1.1.2.3. ИГМ включают концептуальные представления и данные наблюдений

Соотношение концептуальных представлений и данных наблюдений в рамках ИГМ будет варьировать в зависимости от типа проекта, его масштаба, инженерно-геологической

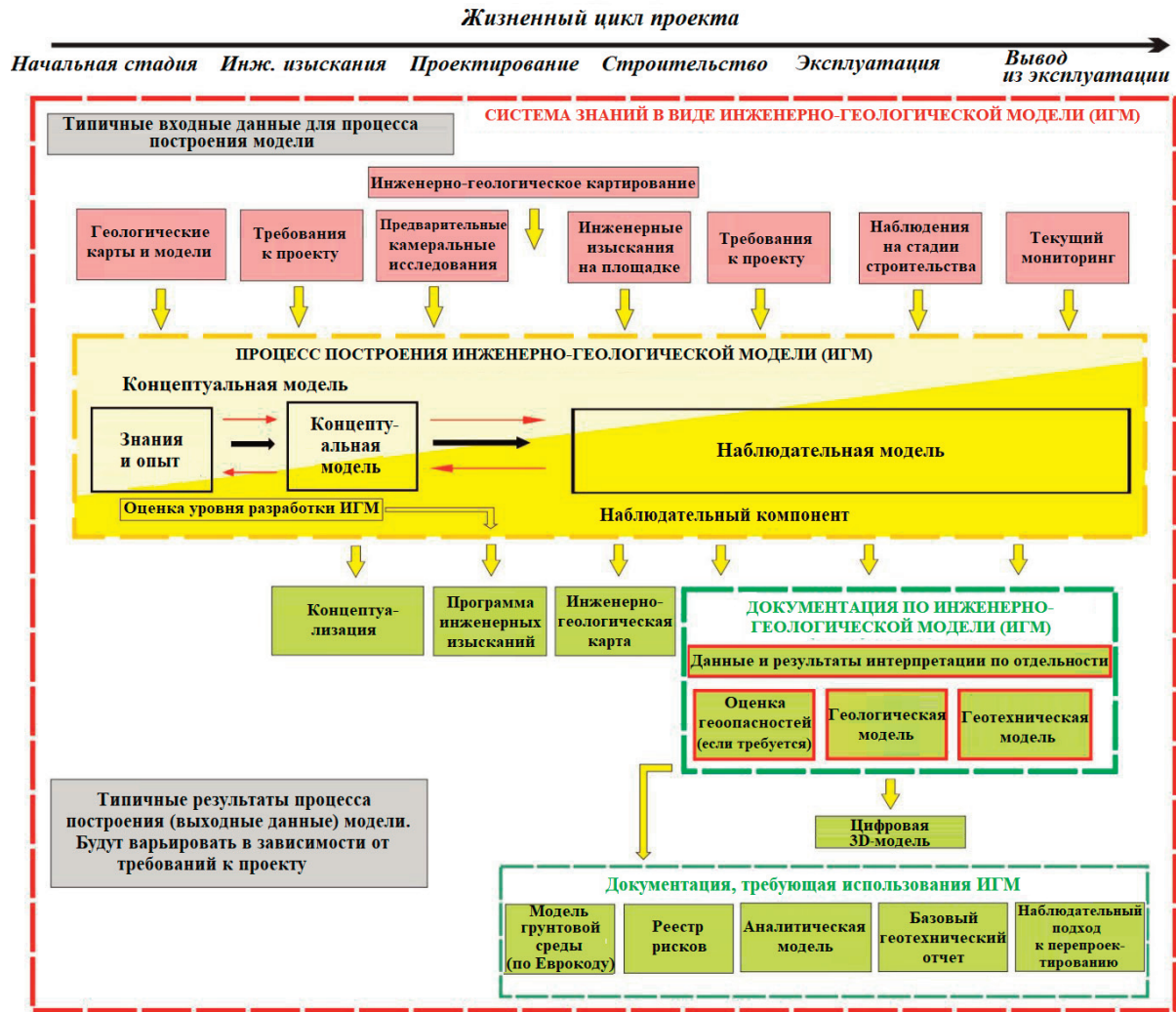


Рис. 1-1. Блок-схема, отражающая процесс разработки ИГМ в течение цикла реализации проекта

сложности площадки и стадии развития проекта (см. рис. 1-1). Оценка грунтовой среды в начале жизненного цикла проекта носит в первую очередь концептуальный характер, поскольку она основана главным образом на знаниях, опыте и ссылках на другие примеры из опубликованных источников по аналогичным геологическим, геоморфологическим и гидрогеологическим условиям. По мере развития проекта и поступления все большего количества данных наблюдений происходит эволюция ИГМ, но концептуальная модель остается основой для оценок интерпретаций этих данных.

Методики получения концептуальных и наблюдательных моделей различны. Разработка первых включает в себя процесс концептуализации, разработка вторых – оценку данных и формирование информационной базы. Однако их применение при создании инженерно-геологической модели тесно взаимосвязано. Они образуют два разных, но важных взаимодополняющих инструмента, которые необходимо комбинировать на всех этапах развития проекта для создания требуемой ИГМ.

На любом этапе жизненного цикла проекта следует внимательно проводить инженерный

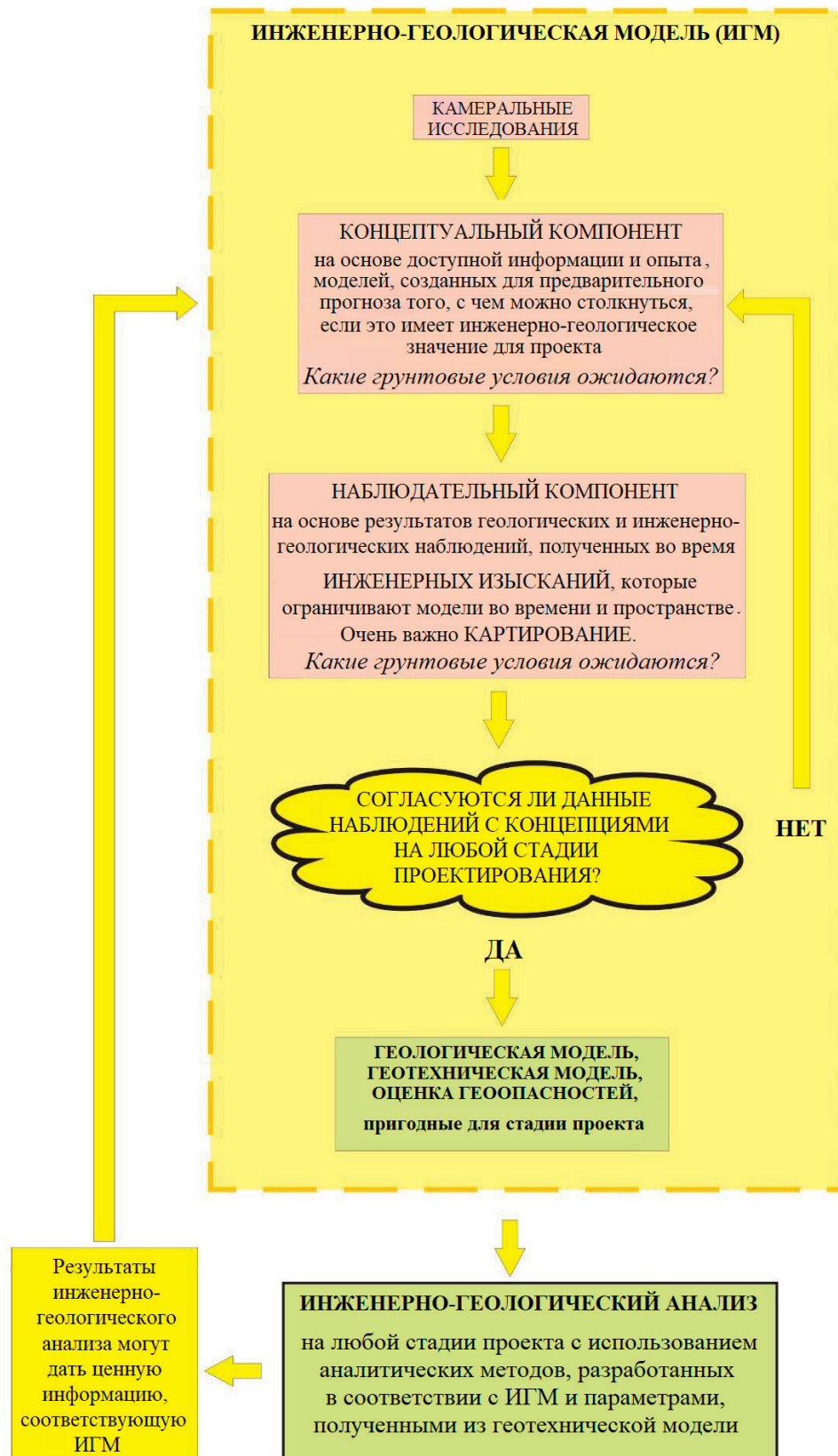


Рис. 1-2. Инженерный анализ необходимо продолжать до тех пор, пока концепции и результаты наблюдений не станут согласованными

анализ до тех пор, пока концептуальные представления и данные наблюдений не станут согласованными и пока не появится возможность учесть остаточные расхождения в качестве рисков проекта, принятых всеми его участниками и заинтересованными сторонами (рис. 1-2).

1.1.2.4. ИГМ важна на протяжении всего жизненного цикла проекта

Разработка ИГМ должна стартовать на начальной стадии развития проекта и пересматриваться на протяжении всего его жизненного цикла, потенциально передаваться всем владельцам и консультантам и обеспечивать прозрачную и логичную основу для разработки проектной документации, связанной с грунтовой средой (см. рис. 1-1). Система знаний ИГМ также должна быть неотъемлемой частью системы управления проектом, поскольку в этой модели документируется все, что известно о грунтовой среде, и, следовательно, она должна быть частью контрактной документации (в зависимости от механизма представления контракта) и основой для проектирования.

1.1.2.5. ИГМ должны разрабатываться для всех проектов

ИГМ должны разрабатываться для всех проектов, которые взаимодействуют с грунтовой средой, и быть в равной степени применимыми как к очень крупным, так и к весьма небольшим проектам, а также во множестве различных географических масштабов. Следует обратить внимание, что в случае очень небольшого простого проекта ИГМ может быть представлена в виде одного краткого отчета с пояснениями.

1.1.2.6. Для разработки ИГМ требуется знание геологии и инженерии

Для разработки эффективной ИГМ требуются знание и опыт в сферах как геологии, так и инженерии, но акцент должен быть сделан на геологию. Эти знания должны основываться на образовании, в идеале предполагающем по крайней мере первую ученую степень в области геологии или ученую степень в сфере, в которой геология является основным компонентом, и последипломную специализацию в области инженерной геологии или геотехники либо значительный период работы под наставничеством опытного инженера-геолога. Иногда и в случаях простых проектов компетентный инженер-геотехник, обладающий значительными геологическими знаниями и/или практическим опытом работы в проектах, имеющих дело с геологическими условиями, должен быть в состоянии создать надежную ИГМ.

1.2. ПРОЦЕСС РАЗРАБОТКИ ИГМ

1.2.1. Общее представление о процессе разработки

1.2.1.1. Процесс разработки

Процесс разработки ИГМ включает основные этапы, перечисленные в таблице 1-1, обычно с повторением (итерациями) большинства этапов.

Таблица 1-1. Основные этапы разработки ИГМ	
1	Создание команды, определение области применения и цели. Определение вероятного уровня разработки ИГМ
2	Сбор доступной инженерной и инженерно-геологической информации, имеющей значение для проекта, в рамках предварительных камеральных работ. При наличии возможности – проведение первоначального рекогносцировочного картирования компетентным инженером-геологом
3	Концептуализация возможных инженерно-геологических условий на основе имеющихся знаний и опыта, а также результатов предварительных камеральных исследований в начале жизненного цикла проекта, но с условием проведения повторной оценки с использованием другой информации, которая станет доступной на более поздних этапах развития проекта. Подтверждение уровня разработки ИГМ
4	Определение и документирование ключевых опасностей и неопределенностей в первоначальном реестре рисков. Этот реестр используется на протяжении всего жизненного цикла проекта и нуждается в регулярном обновлении
5	Получение данных наблюдений в ходе исследований, которые могут включать (но не ограничиваются перечисленным далее): дистанционное зондирование, картирование, геофизические исследования, инженерно-геологическое бурение, отбор проб, испытания. Важность инженерно-геологического картирования при исследованиях трудно переоценить
6	Объединение результатов наблюдений и концепций для интерпретации условий площадки. Выделение инженерно-геологических элементов, интерпретация их распределения и создание геологической модели. При необходимости – повторная оценка концептуальной модели
7	Характеристика инженерно-геологических элементов, гидрогеологических условий и геологических процессов с использованием геотехнических параметров, полученных на основе результатов камеральных работ, исследований и опыта, и создание геотехнической модели, а также, при необходимости, оценка геологических опасностей
8	Определение любых других существенных опасностей, неопределенностей, пробелов и несоответствий в системе знаний модели. Они определяют потенциальные риски для проекта и должны быть внесены в реестр рисков
9	Оценка рисков и, если необходимо, проведение дополнительных исследований в целях улучшения системы знаний, сведения к минимуму всего неизвестного, снижения рисков или рассмотрения альтернативных инженерно-геологических вариантов для снижения рисков до приемлемого уровня
10	Документирование всего вышеперечисленного в серии систематических отчетов со значительным графическим наполнением

1.2.1.2. Первоначальные шаги

В начале развития проекта следует задать следующие ключевые вопросы.

- Где расположен объект проектирования (география, геология, геоморфология, экология)?
- Каковы тип и масштаб проекта, как он будет взаимодействовать с грунтовой средой, каковы ключевые размеры и требования к проекту, включая проектный срок службы, и каковы основные геотехнические ограничения, проблемы, опасения или последствия неудач для проекта такого типа?
- Какая имеется информация относительно возможных грунтовых условий?
- Какова геологическая, геоморфологическая, антропогенная история региона/площадки, которая может иметь инженерно-геологическое значение для проекта?
- Какие могут присутствовать геологические опасности?
- Каковы гидрогеологические и гидрологические условия и как они могут повлиять на проект?
- Каков текущий статус проекта? Например, приостановлен ли он, ищется ли финансовая поддержка, находится ли он на стадии строительства и т.д.?

Ответы на эти ключевые вопросы остаются актуальными на протяжении всего жизненного цикла проекта.

1.2.2. Выбор уровня разработки ИГМ

Уровень разработки ИГМ, который следует принять, зависит от геотехнической сложности, рассматриваемой в контексте сложности проекта и последствий неудач. Рекомендации по выбору уровня разработки ИГМ приведены в таблицах 1-2 и 1-3. Уровень разработки следует пересмотреть, если исследования покажут, что геотехническая сложность выше первоначально ожидавшейся.

1.2.3. Детали процесса разработки

1.2.3.1. Создание команды, определение состава, объема и цели работ

Состав команды будет зависеть от вероятной сложности как проекта, так и грунтовой среды. Это может быть как один человек с необходимыми геологическими и инженерными знаниями для небольшого проекта, так и мультидисциплинарная группа и группа экспертов для крупного проекта. Роли и сферы ответственности членов команды, проверяющего (проверяющих) и утверждающих должны быть задокументированы. Команда должна начать с определения состава, масштаба и назначения ИГМ и принять во внимание любые планируемые изменения в праве собственности на эту модель (например, когда ИГМ разрабатывается государственным учреждением, а затем передается тем, кто выиграл тендерный конкурс на заключение контракта). Если команда присоединяется к проекту на более позднем этапе или проект передается между отдельными сторонами контракта, то должна быть проверена и проанализирована существующая проектная документация для выявления любых пробелов или несоответствий.

1.2.3.2. Сбор необходимой инженерно-геологической информации в ходе предварительных камеральных исследований

Предварительные камеральные исследования, то есть подготовительный камеральный этап

Таблица 1-2. Уровни разработки ИГМ в зависимости от сложности проекта и геотехнической сложности*

Сложность проекта**	Геотехническая сложность грунтовых условий, которая может повлиять на проект, как указано в концептуальной модели, разработанной в соответствии с настоящим руководством		
	ПРОСТЫЕ / ОДНОРОДНЫЕ УСЛОВИЯ: пологонаклонные или горизонтальные слои, однородные дисперсные грунты, отсутствие геопасностей, мало геотехнических ограничений	УМЕРЕННО СЛОЖНЫЕ / ИЗМЕНЧИВЫЕ УСЛОВИЯ: изменчивые складчатость и/или разрывные нарушения, изменчивые дисперсные грунты, несогласия, мало геопасностей, некоторые потенциальные геотехнические ограничения	СЛОЖНЫЕ / ОПАСНЫЕ УСЛОВИЯ: высокоизменчивые складчатость и/или разрывы сплошности, мощные неоднородные дисперсные грунты, несогласия, значительная геотехническая сложность, значительные геопасности, такие как крупные оползневые комплексы, активные разломы, карст или потенциальная возможность увеличения масштабов/интенсивность и и/или частот возникновения геопасностей в результате реализации проекта
Незначительный строительный объект, небольшая занимаемая им площадь, незначительные последствия неудач	Уровень 1	Уровень 1	Уровень 2
Среднемасштабный строительный объект со средними последствиями неудач	Уровень 2	Уровень 2	Уровень 3
Большая инфраструктура, крупные линейные объекты, региональные исследования, серьезные последствия неудач	Уровень 3	Уровень 3	Уровень 3

* При оценке подходящего уровня разработки ИГМ следует обратиться за консультацией к компетентному инженеру-геологу.

** Сложность проекта субъективна; незначительные и средние последствия неудач обычно ограничиваются финансовыми последствиями; серьезные последствия неудач обычно связаны с потерей человеческих жизней. Неудачей называем ситуацию, когда проект не реализуется (не развивается) в соответствии с проектными/заданными показателями.

Таблица 1-3. Рекомендации по видам и объемам работ для разных уровней разработки ИГМ

Типы работ	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3
Специализированные исследования	Нет	Нет	Привлечение отдельных исследований геоопасностей (там, где они применимы). Возможность специализированных геологических исследований. Возможность исследований взаимодействий сооружения и грунтовой среды
Картирование	Минимальные посещения площадки, рекогносцировочное картирование, схематическая инженерно-геологическая карта / схематический инженерно-геологический разрез площадки	Инженерно-геологическое картирование, включающее разрезы площадки и прилегающих участков	Инженерно-геологическое картирование, включающее разрезы площадки и прилегающих участков в множестве масштабов
Исследования грунтовой среды	Одноэтапные небольшие исследования грунтовой среды, например с помощью разведочных шурфов, буровых скважин по мере необходимости	Исследования грунтовой среды с использованием бурения скважин, испытаний коническим пенетрометром (методом СРТ), геофизических методов и т.д. Применение соответствующего оборудования	Многоэтапные исследования грунтовой среды с использованием бурения скважин, испытаний in situ, геофизических методов и т.д. Применение соответствующего оборудования и долгосрочного мониторинга по мере необходимости. Сбор исходных данных
Лабораторные испытания	Ограниченные лабораторные испытания или их отсутствие	Лабораторные испытания по мере необходимости	Обширные и, возможно, специализированные лабораторные испытания по мере необходимости
Документирование	Документирование ИГМ в виде простого сводного отчета по данным и их интерпретации	Документирование ИГМ в отчетах по данным и их интерпретации	Документирование ИГМ в отчетах по данным и их интерпретации. Использование технологий цифровой 3D-визуализации
Команда	За выполнение работ может отвечать один человек	За выполнение работ отвечает небольшая группа инженеров-геологов и инженеров-геотехников	За выполнение работ отвечает большая мультидисциплинарная группа
Проверка, анализ	Внутренняя проверка*	Внутренняя/внешняя экспертная оценка*	Внешняя проверка / группа экспертов*
* Могут существовать требования к проверке, специфические для конкретной компании			

инженерных изысканий, – это процесс сбора доступных материалов и информации, из которых можно было бы извлечь максимальную пользу, прежде чем тратить время и деньги на сбор новых данных. Источниками первичной информации скорее всего будут геологические карты и их описания, топографические карты, любые существующие данные по исследованиям территории будущей реализации проекта (данные бурения, дистанционного зондирования, информация о геоопасностях и т.д.). Не следует пренебрегать историческими сведениями из-за того, что они были заменены более свежими данными или зарегистрированы в стиле, не соответствующем действующим стандартам.

В рамках предварительных камеральных исследований следует провести рекогносцировочное картирование там, где это осуществимо и практически целесообразно. Это позволяет оценить данные этого этапа и способствует концептуализации.

1.2.3.3. Концептуализация ИГМ

Концептуализация – это процесс, в ходе которого рассматривается вся доступная информация и формируется понимание того, какими скорее всего будут грунтовые условия на площадке и как они будут изменяться с течением времени. Первоначально это надо делать после предварительных камеральных исследований, но затем – периодически по мере получения дополнительной информации. Концептуализация позволяет оценить, какие могут присутствовать условия, их изменчивость, а также геологические и геоморфологические процессы, которые их сформировали и которые могут иметь инженерно-геологическое значение для проекта. Иногда полезно разработать динамическую концептуальную модель, развивающуюся во времени, чтобы проиллюстрировать, как грунтовые условия могли измениться и в недавнее, и в геологическое время.

Во время концептуализации следует учитывать следующие аспекты, связанные с площадкой.

1.2.3.3.1. Окружающая обстановка

Учет этого аспекта должен основываться на понимании:

- общей тектонической обстановки и региональной геологии в месте реализации проекта;
- текущих, прошлых и потенциальных будущих климатических условий в месте реализации проекта;
- необходимости рассмотрения обстановки за пределами площадки, непосредственно охватываемой проектом, например для оценки опасности от возникающих там оползней.

1.2.3.3.2. Стратиграфия – типы скальных и дисперсных грунтов и их взаимосвязи

Учет данного аспекта требует понимания процессов образования скальных пород, их изменений, а также происхождения, переноса и отложения дисперсных грунтов, то есть тех процессов, которые привели к формированию скальных и дисперсных грунтов на территории реализации проекта. Это позволяет учитывать свойства массивов скальных пород, скальных и дисперсных материалов, вероятные характеристики инженерно-геологических элементов, включая граничные условия этих элементов, а также их вероятные геометрию, распределение и взаимосвязи – как друг с другом, так и с проектом.

Необходимо понимать стратиграфический возраст грунтов и определять последовательность

геологических событий, которые повлияли на них с момента их образования. На этом основывается применение подхода общей геологической модели, при котором все инженерные характеристики грунтовой среды интерпретируются как результат всей геологической и геоморфологической истории рассматриваемой территории.

1.2.3.3.3. Геологическое строение

Необходимо развивать понимание геологических структур, включая наличие тектонических особенностей всех масштабов, природу границ инженерно-геологических элементов, разрывов сплошности внутри них, их происхождение, геометрию, размеры, устойчивость, протяженность, характерные особенности, инженерно-геологическое значение. Это понимание должно также включать время и последовательность событий при формировании скальных и дисперсных пород, фазы деформации, развитие рельефа и эффекты снятия напряжений.

1.2.3.3.4. Поверхностные и подповерхностные процессы

Требуются идентификация возможных активных или повторно активизирующихся геологических опасностей и первоначальная оценка их вероятных изменений по величине и частоте с течением времени. Также следует оценить гидрологические и гидрогеологические условия и то, как они могут изменяться с течением времени.

1.2.3.3.5. Первоначальная инженерно-геологическая характеристика

Может существовать возможность привязки геотехнических параметров к частям концептуальной модели на основе имеющихся данных или знаний в зависимости от того, насколько это приемлемо с учетом доступных данных (например, прочности дисперсных и скальных грунтов, жесткости, проницаемости, скорости геоморфологических процессов и т.д.). Для составления первоначального реестра рисков может быть использована оценка потенциальных геотехнических рисков (и предполагаемых возможностей проекта).

1.2.3.3.6. Первоначальная геологическая модель

Концептуализация позволит создать первоначальную геологическую модель, которая может быть использована для составления программы инженерных изысканий. Затем эта модель уточняется на основе сбора данных наблюдений, полученных в ходе изысканий.

1.2.3.4. Получение данных наблюдений для территории будущей реализации проекта при инженерных изысканиях

Информация, полученная в ходе предварительных камеральных исследований, является отправной точкой для разработки как концептуальных, так и наблюдательных моделей. Однако большинство результатов наблюдений получают на этапе(-ах) собственно инженерных изысканий. Дальнейшие данные наблюдений должны добавляться в ходе строительства и эксплуатации объекта.

Геологическая интерпретация условий залегания и/или стратиграфического возраста должна сопровождаться описаниями всех материалов на основе инженерно-геологического бурения, изучения разведочных шурфов, обнажений и т.д.

Изыскания, результаты которых состоят только из данных наблюдений и итогов их интерпретации без использования концептуальной основы, скорее всего будут по существу неправильными – и такие результаты не должны приниматься.

После концептуализации должно быть получено широкое представление о возможных характеристиках и распределении инженерно-геологических элементов на площадке, о природе любых геологических опасностей и о любых предполагаемых пробелах в системе знаний. Затем это понимание должно сосредоточиться на характеристиках грунтовой среды, имеющих решающее значение для проектирования, и использоваться для определения целей и планирования исследований, которые улучшат понимание и уменьшат неопределенности в этих критических областях.

Следует подчеркнуть важность систематического картирования при изысканиях для любого проекта. При этом необходимо использовать осмысленные, содержательные результаты наблюдений по всей территории предполагаемых работ и разумные, хорошо обоснованные интерпретации этих результатов. Неотъемлемой частью любого проекта должна быть инженерно-геологическая карта, составленная и «принадлежащая» команде, ответственной за проведение изысканий. По сути, такие карты должны разрабатываться в полевых условиях, хотя все чаще полевой компонент включает проверку карт, составленных в камеральных условиях, путем объединения результатов наблюдений, полученных из различных наборов данных в цифровой 2D- или 3D-среде либо на основе интерпретации изображений дистанционного зондирования. Важно, чтобы любое инженерно-геологическое картирование также охватывало геологические закономерности, например линейменты, структурные закономерности, типы разрывов сплошности, следы контактов и т.д., а также геоморфологические особенности территории.

Для более крупных проектов либо более сложных площадок или критических структур изыскания обычно проводятся в несколько этапов. При этом полученные данные наблюдений сопоставляются с концептуальной моделью, чтобы определить, какие области неопределенностей и какие риски еще предстоит оценить на последующих этапах исследований.

При изысканиях получают данные наблюдений, в которые обычно входят результаты исследований такими методами, как:

- топографическая съемка и все более широко используемая лидарная съемка (LiDAR – дистанционное зондирование на основе использования лазерного излучения для измерения расстояний до объектов и получения детальной информации об их форме и структуре) для создания цифровых моделей рельефа;
- инженерно-геологическое картирование в различных масштабах – от регионального до локального (изучение территории расположения объекта проектирования) и детального (изучение геотехнических компонентов и отдельные исследования грунтового основания); все данные картирования должны быть интегрированы в единый набор данных, который можно видеть и анализировать в различных масштабах;
- интрузивные методы, например с помощью бурения скважин, создания разведочных шурфов, шахт, штолен и т.д.;
- наблюдения и измерения в скважинах, например скважинным сканером, геофизическими и другими инструментами;
- измерения установленными контрольно-измерительными приборами и мониторинг;
- лабораторные и полевые испытания;
- гидрогеологические и гидрологические измерения;

- геофизические исследования;
- описание и классификация (например, типов и классов прочности скальных грунтов с использованием признанных систем и терминологии);
- измерение глубин залегания инженерно-геологических элементов при бурении скважин, а также простираний и падений пластов и разрывов сплошности;
- дистанционное зондирование с помощью интерферометрических радиолокаторов/радаров с синтезированной апертурой (InSAR);
- другие наблюдения, в том числе с построением динамических наблюдательных моделей, развивающихся во времени (например, временных рядов сейсмичности, дождевых осадков, оползней и т.д.), которые имеют решающее значение для прогнозирования частоты будущих геоопасностей.

1.2.3.4.1. Верификация входных данных

Перед любой интерпретацией результатов наблюдений надо провести проверку, анализ и сличение данных – для каждого набора данных должны быть протестированы ключевые вопросы их точности, нужности и репрезентативности. Любые сомнения в точности и репрезентативности набора данных должны быть задокументированы с обсуждением возможных причин.

1.2.3.5. Объединение в ИГМ концептуальных представлений и результатов наблюдений

Объединение концептуальных и наблюдательных компонентов включает *интерпретацию*. Итеративный процесс объединения концептуальных и наблюдательных компонентов ИГМ при интерпретации должен быть прослеживаемым, документируемым и структурированным. Следует избегать субъективных суждений людей, ответственных за разработку ИГМ, и заменять их объективными и поддающимися оценке источниками (например, моделями и описаниями практических случаев из литературы, результатами картирования, геотехнических исследований, геотехнического мониторинга и т.д.) вместе с обоснованием их принятия для интерпретации.

1.2.3.6. Определение и характеристика инженерно-геологических элементов

Ключевым продуктом любой ИГМ являются инженерно-геологические элементы, выделенные на основе понимания их инженерно-геологических характеристик (поведения) и подходящие для проектирования. На определении этих элементов основывается разработка **геологической модели**.

Распространенный подход – это использование инженерно-геологических элементов, выделяемых на основе выявленных на площадке отличительных литостратиграфических подразделений (то есть единиц дисперсных и скальных грунтов, которые можно разграничить) и обычно являющихся подразделениями хроностратиграфических (на основе возраста) единиц, представленных на геологической карте. Однако литостратиграфические единицы могут не соответствовать наиболее подходящим для выделения инженерно-геологическим элементам, то есть они могут не учитывать характерные геоморфологические процессы, геотехнические особенности, гидрогеологические характеристики и т.д. Кроме того, разрешение в отношении стратиграфических единиц может не соответствовать назначению модели.

Тем не менее инженерно-геологические элементы не должны пересекать литостратиграфические границы. Разные литостратиграфические единицы имеют разную геологическую историю, а разные геологические истории не могут относиться к одному инженерно-геологическому элементу даже при сходных геотехнических характеристиках. Исключения – зоны разломов, которые, возможно, необходимо рассматривать отдельно и которые, по определению, пересекают литостратиграфические границы. Следует обратить внимание, что эти границы будут зависеть от масштаба: границы в модели регионального масштаба могут отличаться от границ в модели детального масштаба (в рамках площадки изысканий).

Выделенные инженерно-геологические элементы должны отражать те условия, которые имеют значение для проекта, и могут зависеть от геологических причин, таких как выветривание, изменения по сложению и составу и образование разрывных нарушений. На рисунке 1-3 описаны операции, связанные с выделением инженерно-геологических элементов и, следовательно, с разработкой геологической модели. Как и в случае с другими аспектами ИГМ, разрешение и масштаб инженерно-геологических элементов должны быть четко увязаны с областью применения и назначением ИГМ. Принятые инженерно-геологические элементы надо пересматривать по мере поступления дополнительных данных.

1.2.3.6.1. Геотехническая сложность

На геотехнически сложных территориях геотехнические свойства могут быстро изменяться в потенциально широком диапазоне даже в пределах площадки проекта. Там, где это возможно, геотехническая сложность должна быть отражена в геологической модели в виде достаточного количества инженерно-геологических элементов с соответствующими распределением и взаимосвязями. Там, где это невозможно, может потребоваться упрощение – и в документации по ИГМ должны описываться геологические процессы и геологическая история, которые привели к геотехнической сложности, а также характер любых упрощающих допущений, использованных при выделении инженерно-геологических элементов, при этом должна быть проиллюстрирована потенциальная сложность с помощью визуализации концептуальной модели.

1.2.3.7. Инженерно-геологическое описание

Инженерно-геологическое описание включает оценку и присвоение геотехнических параметров, относящихся к разработке проекта, каждому инженерно-геологическому элементу геологической модели, которая затем преобразуется в **геотехническую модель**.

Этот процесс начинается во время концептуализации, хотя любые параметры, присвоенные на этом этапе, вероятно, будут связаны со значительными неопределенностями. Инженерные изыскания включают проведение полевых и лабораторных испытаний, позволяющих оценить нужные геотехнические параметры, которые будут варьировать в зависимости как от грунтовых условий, так и от типа проекта. Таким образом, результаты изысканий повысят надежность характеристик инженерно-геологических элементов и уменьшат неопределенности, а также, вероятно, разовьют то, что было предусмотрено в концептуальной модели.

Геотехническая модель может включать упрощение деталей, содержащихся в геологической модели. Например, в отношении сложной зоны разлома все может быть сведено к ограничивающим поверхностям и некоторым упрощающим допущениям в отношении

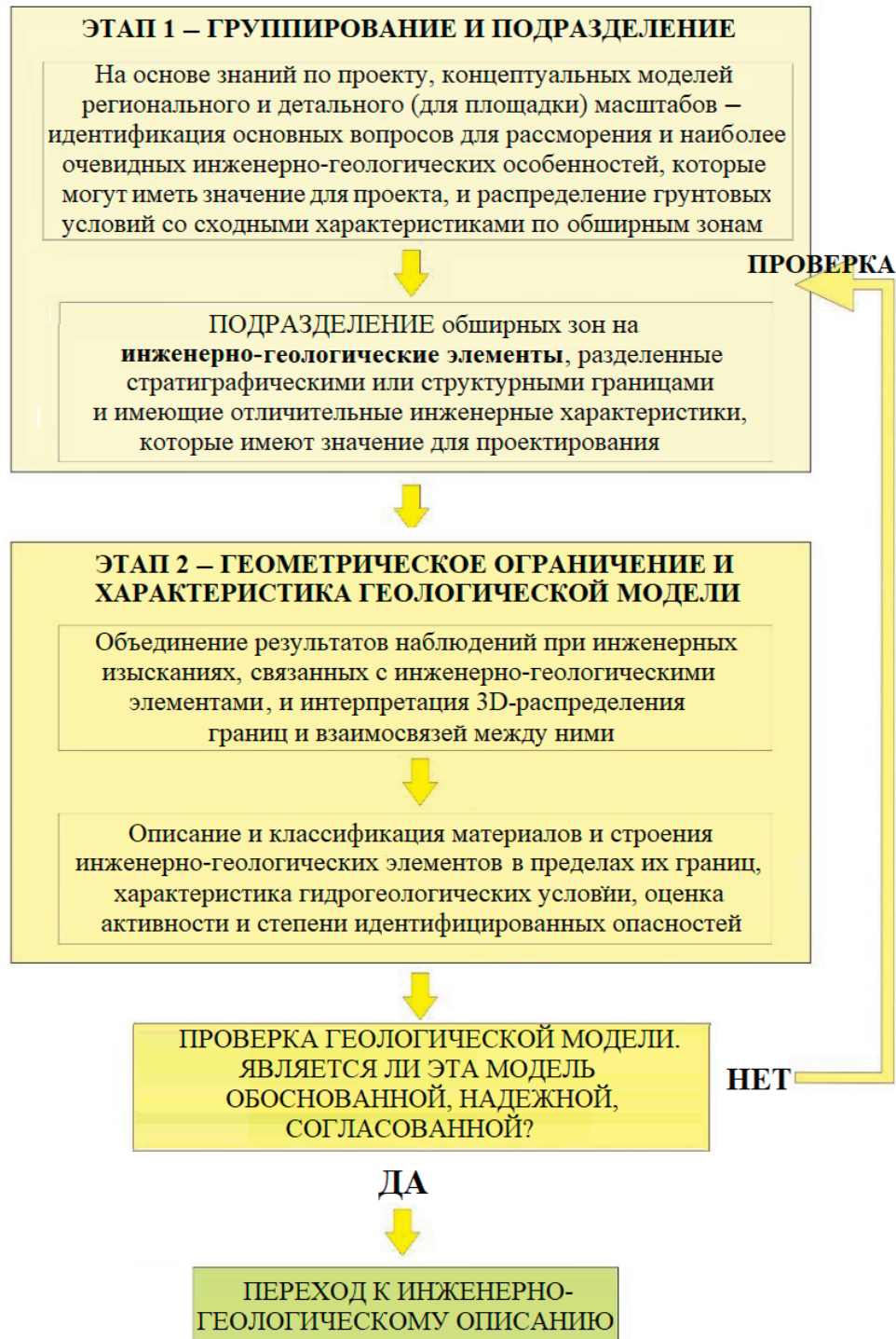


Рис. 1-3. Выделение инженерно-геологических элементов и создание основы геологической модели

прочности, жесткости и проницаемости всей зоны разлома. Однако любое упрощение не должно убирать ключевые инженерно-геологические элементы, которые необходимо рассматривать по отдельности из-за их геотехнических характеристик (поведения).

Надо принять подход, включающий:

- уделение основного внимания инженерно-геологическим характеристикам, которые имеют отношение к проекту;
- группирование результатов лабораторных и полевых испытаний для каждого выделенного инженерно-геологического элемента;
- присваивание свойств материалов и геотехнических параметров в первую очередь на основе результатов изысканий, проведенных на конкретной площадке (однако они могут быть дополнены значениями, полученными на основе опыта, теории, корреляций или эмпирических методов при условии, что метод определения объяснен, обоснован и на него даны ссылки);
- рассмотрение и учет погрешностей, возникающих из-за трудностей с отбором проб и испытаниями, а также количества испытаний для каждого элемента, и принятие решения о диапазоне репрезентативных значений для этого элемента (но не надо проводить усреднение свойств материала, которое маскирует наличие существенных более слабых зон; и необходимо оценить весь диапазон результатов, чтобы определить вероятность того, что значения будут выше и/или ниже репрезентативных);
- сравнение репрезентативных значений с известными из практического опыта и публикаций для аналогичных элементов;
- рассмотрение и объяснение любых аномальных или экстремальных результатов (они могут указывать на то, что инженерно-геологические элементы могут нуждаться в уточнении);
- указание любых ограничений в данных или анализе.

Следует обратить внимание, что выбор проектировщиком инженерно-геологических параметров для использования при анализе должен основываться на вышеуказанной информации, в идеале представленной графически, в сочетании с учетом целей проекта, рисков и, возможно, требований нормативных документов.

1.2.3.7.1. Зонирование

После выделения инженерно-геологических элементов и оценки геотехнических характеристик может быть полезным определение зон или доменов с одними и теми же геотехническими характеристиками. Эти зоны могут быть определены на основе геомеханического поведения, сейсмических скоростей, классификаций массивов пород и т.д., но также на основе любого атрибута инженерной значимости для проекта, например потенциала образования бисульфата, предрасположенности к оползням или геохимии подземных вод, – так, чтобы ИГМ могла использоваться для многих видов анализа для строительства, оценки рисков, оценки технологичности строительства и т.д. Решение о подходящем зонировании должно приниматься совместно с проектировщиками и более широкой командой инженеров-геологов.

Масштаб, в котором проводится зонирование, должен отражать характер данных и то, как будут использоваться выходные данные. Зонирование не должно быть ни более, ни менее детальным, чем позволяют данные.

Распространенной ошибкой является зонирование грунтовых условий, скажем, на основе их определения в масштабах отдельных скважин и последующих попыток «соединить точки» между скважинами. Используя этот метод, практически невозможно более широко учесть геологические условия и общую геологическую историю. Для того чтобы ИГМ могла эффективно помогать инженерно-геологическому анализу и проектированию, разрешение и

масштаб зонирования должны определяться чувствительностью используемых методов анализа к определенным критическим зонам, выявляемым моделью.

1.2.3.8. Неопределенности, пробелы и несоответствия в ИГМ

В ходе разработки ИГМ надо периодически оценивать степень соответствия между развивающимися концептуальными представлениями и постепенно получаемыми данными наблюдений. Такие оценки, как правило, проводятся на согласованных этапах подготовки отчетности по проекту.

Если есть несоответствие между тем, что ожидается, и тем, что было обнаружено в ходе изысканий, необходимо выявить причины этого и усовершенствовать ИГМ. Если модель во время проектирования не позволяет реалистично спрогнозировать, как грунтовая среда отреагирует на проект с требуемым уровнем достоверности, то для ее улучшения потребуются дополнительная информация. Усовершенствование ИГМ для снижения выявленных рисков может проводиться с помощью дальнейших исследований или стратегий проектирования, таких как повышение консервативности или принятие метода наблюдения во время строительства.

По мере того как проект переходит на этап строительства, состояние взаимодействующей с ним грунтовой среды должно оцениваться в соответствии с условиями, прогнозируемыми ИГМ. Затем необходимо провести оценку того, могут или нет эти изменения потенциально повлиять на методы проектирования или строительства, нуждаются ли эти методы в изменениях, требуется ли обновление реестра рисков.

На протяжении всего процесса разработки ИГМ неопределенности, пробелы и несоответствия могут выражаться как риски. Если потенциальные риски проекта оцениваются как значительные, они должны быть занесены в реестр рисков. Управление этими рисками должно основываться на понимании уровня рисков, приемлемого для заказчика и широкой общественности и определяемого любыми законодательными документами. Готовность/толерантность заказчика к принятию рисков должна основываться на информированном понимании известных грунтовых условий, которое должно быть обеспечено с помощью ИГМ.

1.2.4. ИГМ и Еврокод

Подход, описанный в этих рекомендациях, представляет собой всеобъемлющий процесс, подходящий для разработки базы знаний ИГМ для принятия инженерных решений по проекту любого типа на любом этапе его жизненного цикла. Подход Еврокода имеет более ограниченное применение для выбора этапов проектов определенных типов и включает терминологические отличия, особенно в отношении компонентов «модели грунтовой среды», в то время как концепция инженерно-геологической модели, разрабатываемой на протяжении всего жизненного цикла проекта, не упоминается.

С дополнительной информацией можно ознакомиться в части 2 «Комментарии», в разделе 2.2 «Процесс разработки ИГМ».

1.3. КОМПОНОВКА И ПЕРЕДАЧА ИГМ

1.3.1. Введение

ИГМ должна быть задокументирована в формате, который может быть использован для информирования о ее различных компонентах главным образом консультантов и подрядчиков, а также других сторон и участников проекта.

Необходимо, чтобы эта документация включала как минимум текст, карты и разрезы, но чаще всего она будет состоять из подробного текста и сопровождающих его диаграмм, таблиц, записей в буровых журналах, фотографий, карт, разрезов, наборов данных, обработанных данных и цифровых моделей. И все это должно быть чрезвычайно прозрачным, не требующим пояснений, самодостаточным и доступным для четкого и легкого понимания.

Все закодированные данные ИГМ должны обрабатываться/сохраняться в централизованной, стандартизированной и интегрированной системе управления данными и их представления. Данные могут варьировать от нарисованных от руки карт и разрезов до 3D-моделей (пространственных), иногда включая сложные модели, созданные программным обеспечением, и 4D-модели (пространственно-временные), описывающие скорости процессов.

1.3.2. Краткое описание документации по компонентам ИГМ

В таблице 1-4 представлен пример краткой инструкции, которой надо следовать при документировании различных компонентов ИГМ. Для небольших проектов многие из этих пунктов можно было бы описать в один абзац, а всю документацию представить в одном кратком отчете.

Таблица 1-4. Пример краткой инструкции по документированию различных компонентов ИГМ	
1	Документация по компонентам ИГМ должна соответствовать «Руководству по разработке и применению инженерно-геологических моделей для проектов», разработанному МАИГ
2	Должен быть указан согласованный с заказчиком уровень разработки ИГМ (программа исследований)
3	Должен быть представлен отчет по данным, содержащий результаты всех изысканий, наблюдений и лабораторных испытаний, включая информацию по всем предыдущим исследованиям
4	Должен быть представлен отчет по интерпретации данных (возможно, в виде отдельных отчетов), в который входят: 1) результаты аналитических исследований; 2) концептуальная модель и первоначально выявленные ключевые риски; 3) обоснование инженерных изысканий с учетом концептуальной модели и ключевых рисков, связанных с грунтовыми условиями; 4) выделенные инженерно-геологические элементы – объемы грунта со сходной геологической историей и сходными геотехническими характеристиками/поведением в контексте проектирования; 5) геологическая модель, которая документирует распределение в трехмерном пространстве инженерно-геологических элементов, гидрогеологических условий и геологических процессов, а также то, как они могут изменяться во времени; 6) геотехническая модель, которая включает инженерно-геологическое описание и соответствующие геотехнические параметры каждого аспекта геологической модели; для каждого выделенного инженерно-геологического элемента надо представить инженерно-геологическое описание и геотехнические параметры; 7) карты, планы и разрезы в соответствующих масштабах для иллюстрации интерпретированных геологических и геотехнических моделей и для представления информации, нужной для инженерно-геологической оценки всех геотехнических элементов/частей проекта; часто бывает полезным объединить геологическую, геотехническую и проектную информацию в одном изображении или в их наборе; 8) оценка геологических опасностей, если это необходимо; 9) отчет по цифровой 3D-модели, если она является частью документации

В некоторых случаях программа инженерных изысканий может составляться с использованием ИГМ. Однако по завершении изысканий контрактным требованием может быть только подготовка отчета по их результатам. Но тогда документация по ИГМ будет неполной из-за отсутствия интерпретационного наполнения – и это должно быть признано и задокументировано всеми сторонами контракта.

Для крупных проектов может быть подготовлено несколько томов различных отчетов, в которые включены компоненты ИГМ.

При проведении тендеров на геотехнические услуги для крупных проектов представление всех компонентов ИГМ в идеале должно быть отдельным пунктом повестки дня наряду с представлением отчетов по данным и по их интерпретации. В таких случаях в тендерной документации должны быть конкретно прописаны ожидания по разработке ИГМ, в то время как в процессе оценки тендерных предложений должны учитываться возможности заявителей в отношении ИГМ, а на начальном этапе развития проекта должны быть предусмотрены соответствующие бюджетные ассигнования.

1.3.3. Значение для контракта на проектирование

Проектная документация в идеале должна содержать документацию по компонентам ИГМ, подготовленную в соответствии с настоящим руководством, либо ссылку на нее. В зависимости от стратегии заказчика в отношении контракта на проектирование в плане-графике проекта должны быть предусмотрены «моменты сохранения», в которые должна завершаться подготовка документации по компонентам ИГМ с ее сохранением на основе известных к тому времени данных:

- для небольших проектов может быть предусмотрен один «момент сохранения» – как правило, по завершении инженерных изысканий;
- для более крупных проектов могут применяться некоторые или все из перечисленных ниже «моментов сохранения»:
 - по завершении предварительных камеральных исследований;
 - по завершении каждого этапа изысканий;
 - по завершении каждого этапа проектирования;
 - после согласования контракта на основные строительные работы;
 - после согласования базовых геотехнических условий на момент начала реализации проекта, если это целесообразно;
 - на согласованных промежуточных этапах строительства, связанных с завершением реализации различных объектов проекта, например фундаментов плотин, тоннелей и т.д.

При проведении тендера на выполнение основных работ контрактная документация должна обеспечивать возможность передачи ИГМ участникам тендера, если это позволяют контрактные соглашения.

1.3.4. Представление отчета по ИГМ

В отчетности должно быть четко дифференцировано следующее:

- информация из доступных источников, данные наблюдений;
- результаты интерпретации, в том числе концептуализации;
- экспертные суждения.

Ниже будут описаны рекомендуемые требования к обозначенным типам отчетов.

1.3.4.1. Отчет по данным

Отчет по данным должен содержать такую информацию (но не ограничиваться ею), как:

- цели и согласованные состав и объемы работ;
- местоположение и описание площадки будущей реализации проекта;
- описание региональных и местных геологических условий и любых антропогенных изменений площадки проекта на основе доступных данных, имевшихся изначально;
- подробные данные по любым предыдущим изысканиям на площадке или в непосредственной близости от нее.
- план с указанием мест проведения прошлых и текущих изысканий;
- использованные методы изысканий;
- результаты изысканий и полученная информация;
- информация о проведенных лабораторных и полевых испытаниях и сводку полученных результатов.

Любая интерпретация, проводимая в рамках отчета по данным, например назначение литологических или стратиграфических единиц или интерпретация результатов геофизических исследований, должна быть четко зафиксирована как таковая, а связанная с ней неопределенность (в том числе для альтернативных интерпретаций) должна быть задокументирована. Может быть включен список ограничений, касающихся любых интерпретационных аспектов (в первую очередь данных, содержащихся в отчете).

1.3.4.2. Интерпретационный отчет

Интерпретационный отчет должен включать такие компоненты (но не ограничиваться ими), как:

- ссылка на данные, на которых основана интерпретация (на сами данные или на отчет по данным);
- результаты камеральных исследований;
- концептуальная модель и первоначально выявленные ключевые риски;
- обоснование программы инженерных изысканий с учетом концептуальной модели, ключевых рисков и неопределенностей;
- достаточно детальная и задокументированная информация на основе результатов изысканий, относящаяся к таким аспектам проекта, как:
 - стратиграфия, литология, возраст, выветривание, изменения пород по сложению и составу,
 - структурные условия, характеристики нарушений сплошности или других нарушений,
 - геоморфология и соответствующие поверхностные и подповерхностные процессы,
 - гидрологические и гидрогеологические условия (поверхностные и подземные воды),
 - общая геологическая история, относящаяся к вероятным грунтовым условиям,
 - детальная информация о любых антропогенных изменениях на площадке реализации проекта;
- выделенные инженерно-геологические элементы и основания для их принятия;
- геологическая модель, документирующая распределение в трехмерном пространстве инженерно-геологических элементов, гидрогеологических условий, геологических процессов, их возможных изменений во времени, воздействий на них, их граничных условий, подземных вод, геоморфологических процессов, геологических опасностей, которые наблюдались на участке и вокруг него или были интерпретированы (при этом: геологическая модель должна описывать единицы грунтовой среды со сходными инженерно-геологическими

характеристиками и границы, на которых могут происходить изменения условий; должен быть обсужден региональный контекст геологической модели; должны быть охарактеризованы неопределенности геологической модели; в зависимости от требований к проекту и отчетности представляемая геологическая модель может иметь конкретную направленность, связанную с проектом, и может быть лучше описана, например, как гидрогеологическая модель или модель массива скальных грунтов);

- геотехническая модель, в которой представлены инженерные характеристики и геотехнические параметры каждого соответствующего аспекта геологической модели с учетом проекта, который собираются разработать (при этом: для каждого выделенного инженерно-геологического элемента необходимо представить инженерно-геологическое описание и геотехнические параметры; должен быть описан диапазон свойств материала и указан типичный диапазон параметров; должны быть охарактеризованы неопределенности геотехнической модели; выбор инженерно-геологических параметров для использования при анализе должен основываться на вышеуказанной информации);

- любое зонирование, которое было использовано, или домены, которые были выделены, и основания для их принятия;

- оценка геоопасностей, где это необходимо;
- инженерно-геологическая интерпретация влияния грунтовых условий на проект;
- карты и разрезы в подходящих масштабах, охватывающие площадку проекта и окружающие участки, для иллюстрирования интерпретационных геологической и геотехнической моделей и для представления информации для инженерно-геологической оценки всех геотехнических элементов проекта (при этом: в зависимости от проекта может быть полезным объединение в одном изображении информации, относящейся и к геологической, и к геотехнической модели, в качестве основы для презентации заказчиком, акционерам, страховщикам или широкой общественности);

- отчет по цифровой 3D-модели (если такая модель является частью документации), в котором сообщается о неопределенностях и надежности цифровой модели, а также все соответствующие файлы базы данных, которые включают интерпретированные данные, и файлы 3D-данных (например, файлы сетки для инженерно-геологических граничных поверхностей);

- рекомендации для дальнейшей работы, если это уместно или необходимо;
- информация по оставшимся неопределенностям;
- перечень ограничений, относящихся к любым аспектам отчета, если это будет сочтено необходимым.

1.3.4.3. Базовый геотехнический отчет

В случаях некоторых крупных проектов, особенно при проведении подземных работ, владелец и нанятые им инженеры могут выбрать подготовку базового геотехнического отчета, чтобы распределить риски, связанные с грунтовыми условиями, между заказчиком и подрядчиком. Система знаний ИГМ поддерживает разработку «цифровых исходных данных», «характерных значений» и «исходных грунтовых условий», которые являются компонентами базового геотехнического отчета, связанного с условиями контракта.

1.3.4.4. Инженерно-геологические карты и разрезы

Инженерно-геологические карты и разрезы являются фундаментальной частью системы

знаний ИГМ и должны быть подготовлены в соответствии с настоящим руководством.

1.3.5. Создание и визуализация цифровой 3D-модели

Недавно произошел фундаментальный сдвиг в использовании программного обеспечения для создания цифровых 3D-моделей – обычно для средне- и крупномасштабных проектов или при сложных геологических условиях. Это, в свою очередь, привело к кардинальному улучшению функциональной совместимости и возможности операционного взаимодействия системы знаний ИГМ с другими дисциплинами. Типичный процесс разработки цифровой 3D-модели показан на рисунке 1-4.

1.3.5.1. Программное обеспечение для моделирования

Имеется широкий выбор программных пакетов, которые можно использовать для создания цифровых 3D- и 2D-моделей.

1.3.5.2. Источники данных и управление

Надо сохранять четкие, доступные для извлечения записи о том, как создаются, изменяются, интерпретируются, хранятся наборы данных, а также о верификации и других этапах разработки.

Чтобы облегчить процессы проверки, пересмотра, верификации, утверждения, важно сохранять четкие, доступные для извлечения записи (метаданные) о том, как создаются, изменяются, интерпретируются, хранятся наборы данных.

Для поддержания непротиворечивости, контролируемости и понимания неопределенностей модели полезны связи между исходными наборами данных и модифицированными наборами данных модели.

1.3.5.3. Документация по цифровой 3D-модели

Каждая значимая версия цифровой 3D-модели должна сопровождаться отчетом по цифровой 3D-модели.

В отчете по цифровой 3D-модели должна быть задокументирована следующая информация:

- для какого проекта, назначение и охват модели;
- краткое описание инженерно-геологических условий площадки;
- географическая протяженность, масштаб и возможности применения модели, а также используемая система координат;
- исходные данные для модели, включая данные о грунтовой среде, картографические данные, данные точечных наблюдений по поверхностным и подповерхностным условиям, а также информация о поверхностях и сетках, которые были использованы для создания цифровой модели, об оценке качества и надежности различных наборов данных и о том, какие манипуляции/преобразования были предприняты для их включения в модель;
- единицы и ограничивающие поверхности цифровой модели, которые в зависимости от ее назначения могут быть геологическими, инженерно-геологическими, геоморфологическими, гидрогеологическими или геохимическими;
- данные, которые не использовались, и причины, по которым они не были приняты;

- надежность и статус модели, а также описание любых других допущений и неопределенностей в ней, в том числе в отношении ее достоверности и соответствующих рисков;
- доказательства верификации;

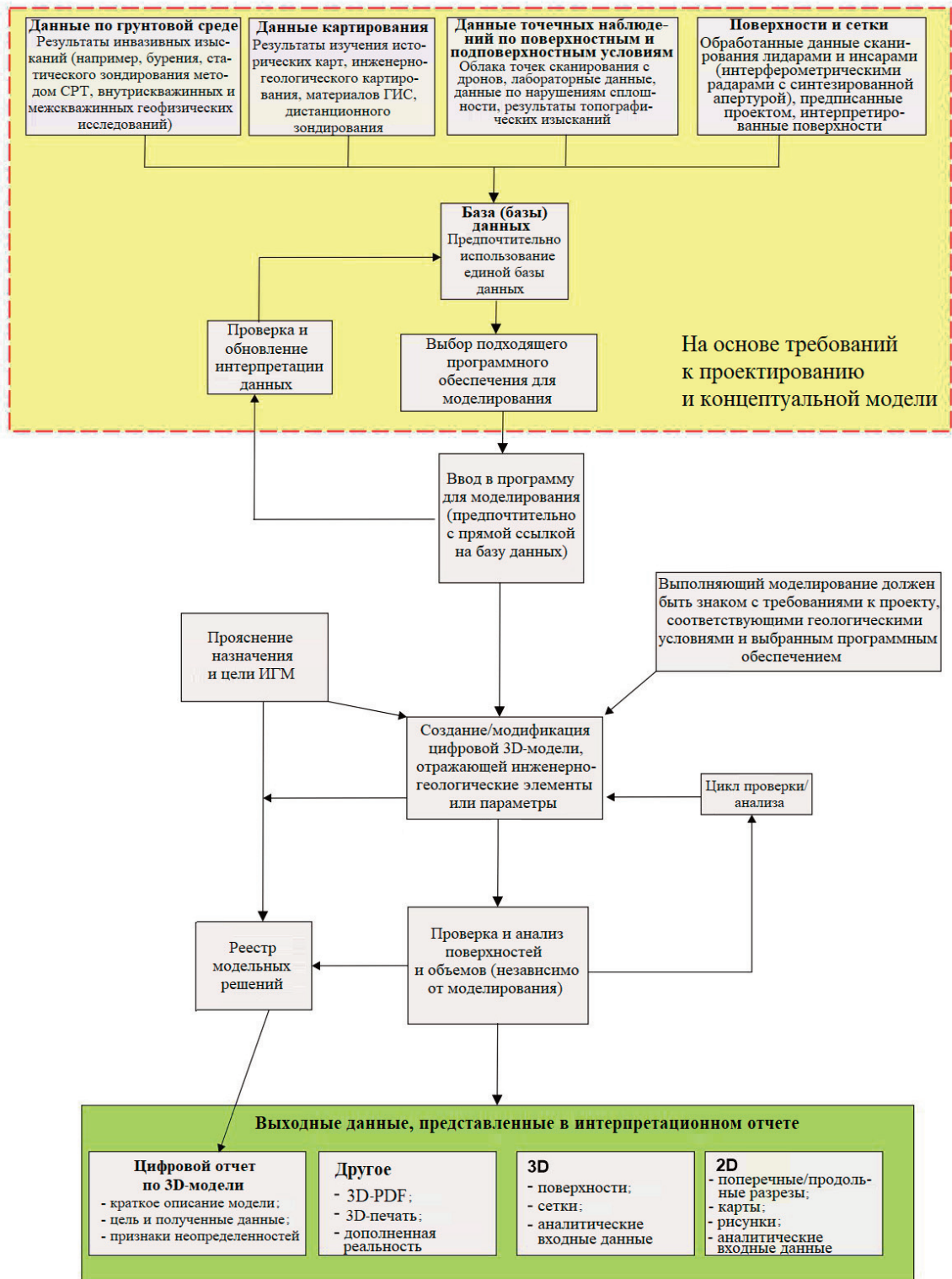


Рис. 1-4. Типичный процесс разработки цифровой 3D-модели

- сводка выходных данных модели, включая любые ограничения;
- реестр решений по модели и перечень операций по управлению данными и/или разработке версий цифровой 3D-модели, куда входят:

- дата принятия решения,
- подробная информация о решении/изменении,
- обоснование решения/изменения,
- пояснения по верификации/пересмотру.

Отчет по 3D-цифровой модели должен обновляться при появлении каждой ее новой версии. При более крупных проектах, где изыскания проводятся по множеству направлений, модель может обновляться ежедневно, поскольку ее можно напрямую связать с базами данных и новые данные будут включаться автоматически. Компетентный инженер-геолог должен проверять новые данные при их импорте, чтобы подтверждать пригодность имеющейся интерпретации и выполнять любое ручное редактирование, необходимое для включения нового набора данных.

1.3.5.4. Проверка и анализ цифровых 3D-моделей

Проверка и анализ цифровой 3D-модели необходимы для того, чтобы продемонстрировать ее надежность с акцентом на качество процесса ее создания, на ясность понимания и прозрачность в отношении неопределенностей. Результаты такой проверки прежде всего должны подтвердить соответствие между выходными данными цифровой модели и реально наблюдаемыми и проинтерпретированными инженерно-геологическими условиями.

В таблице 1-5 перечислены конкретные вопросы, которые надо рассмотреть в ходе анализа и верификации разработанной цифровой 3D-модели.

Таблица 1-5. Список контрольных показателей для проверки цифровых 3D-моделей	
Ключевые вопросы	Текущее состояние
Четко ли определено назначение модели?	...
Охватывает ли модель область, представляющую интерес для проекта, и степень возможных последствий реализации проекта, если модель будет использоваться для оценки его воздействий?	...
Четко ли определены источники данных, использованные для разработки модели?	...
Достаточно ли качество имеющихся данных для назначения модели?	...
Необходимо ли включить в модель какие-либо другие потенциально полезные источники данных?	...
Разумно ли игнорировать данные, которые были специально исключены из модели? Указаны ли причины, по которым эти источники были сочтены непригодными?	...
Является ли адекватным количество точек данных и приемлемо ли их распределение по модели для обоснованной репрезентативной интерпретации?	...
Являются ли использованные манипуляции с данными применимыми и геологически обоснованными?	...
Была ли модель проверена в соответствии с принятым уровнем разработки ИГМ?	...
Выполнил ли разработчик модели ее подробную презентацию для специалиста, проводившего ее проверку?	...
Представлены ли иллюстративные карты и разрезы?	...
Подготовлен ли отчет по трехмерной цифровой модели, включающий реестр принятых при моделировании решений, информацию по выявленным неопределенностям и соответствующим рискам, а также рекомендации по повышению надежности этой модели?	...

1.3.5.5. Выходные данные цифровых 3D-моделей

После того как цифровая 3D-модель и другие связанные с ней выходные данные будут проверены, верифицированы и полностью готовы, саму модель и требуемые выходные данные можно представить заинтересованным сторонам.

Характер выходных данных влияет на способ представления информации. В зависимости от требований проекта это могут быть выводы данных в 3D- или 2D-формате (или оба варианта). Но может и не понадобится программное обеспечение для визуализации, если передача информации с помощью карт, диаграмм, анимаций, презентаций и т.д. будет более эффективной.

Форма представления выходных данных и уровень детализации должны соответствовать требованиям тех, кто будет иметь с ними дело.

С дополнительной информацией можно ознакомиться в части 2 «Комментарии», в разделе 2.3 «КОМПОНОВКА И ПЕРЕДАЧА ИГМ».

1.4. УПРАВЛЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯМИ ИГМ

1.4.1. Введение

Неопределенности в рамках ИГМ могут снизить надежность проектирования и увеличить потенциальные риски для проекта. Должны быть оценены неопределенности и разработаны стратегии для их снижения и связанных с ними рисков для проекта до согласованных уровней.

1.4.2. Источники неопределенностей

Путь накопления знаний в рамках ИГМ отражает динамическую взаимосвязь между концептуальным и наблюдательным компонентами. Эти два фундаментальных компонента ИГМ характеризуются различными источниками неопределенности – концептуальной и наблюдательной.

- Неопределенность, возникающая в процессе концептуализации, обусловлена недостатком знаний или предвзятостью. Она также известна как эпистемологическая (гносеологическая) неопределенность, но для простоты изложения в настоящем руководстве используется термин «концептуальная неопределенность». Концептуальная неопределенность в первую очередь отражает степень пригодности концепций, лежащих в основе ИГМ, которые, в свою очередь, в значительной степени зависят от знаний и опыта тех, кто участвует в их разработке.

- Неопределенность данных в рамках наблюдательной модели обусловлена изменчивостью и случайностью свойств грунтовой среды и точностью измерений, присущей устройствам для испытаний. Она известна как алеаторная (случайная) неопределенность, но для простоты изложения в настоящем руководстве используется термин «наблюдательная неопределенность». Зоны с меньшим количеством прямых наблюдений, вероятно, будут более неопределенными, чем зоны с частыми прямыми наблюдениями. Следует обратить внимание, что любая интерпретация данных в рамках наблюдательной модели будет связана с концептуальной неопределенностью.

1.4.3. Комплексная оценка надежности ИГМ путем ее проверки и анализа

При рассмотрении проекта надо оценивать надежность наблюдательного и концептуального компонентов ИГМ в целом, а не разделять их. Тип проверки определяется уровнем разработки проекта (см. таблицы 1-2 и 1-3 в разделе 1.2.2).

- Для проектов уровня 1 базовую оценку надежности ИГМ обеспечат внутренние проверки. Другой инженер-геолог из проектной команды, ответственной за ИГМ, должен провести проверку разработки и усовершенствования модели. Надежность концептуального компонента должна быть проверена путем сопоставления с соответствующими концептуальными аналогами, полученными на основе образования, опыта и литературных источников, а также должна быть оценена совместимость наблюдательного и концептуального компонентов.

- Для проектов уровня 2 проверка будет такой же, как и для проектов уровня 1, но будет проводиться внешними экспертами. Они могут быть внешними по отношению к проектной команде или к самой организации.

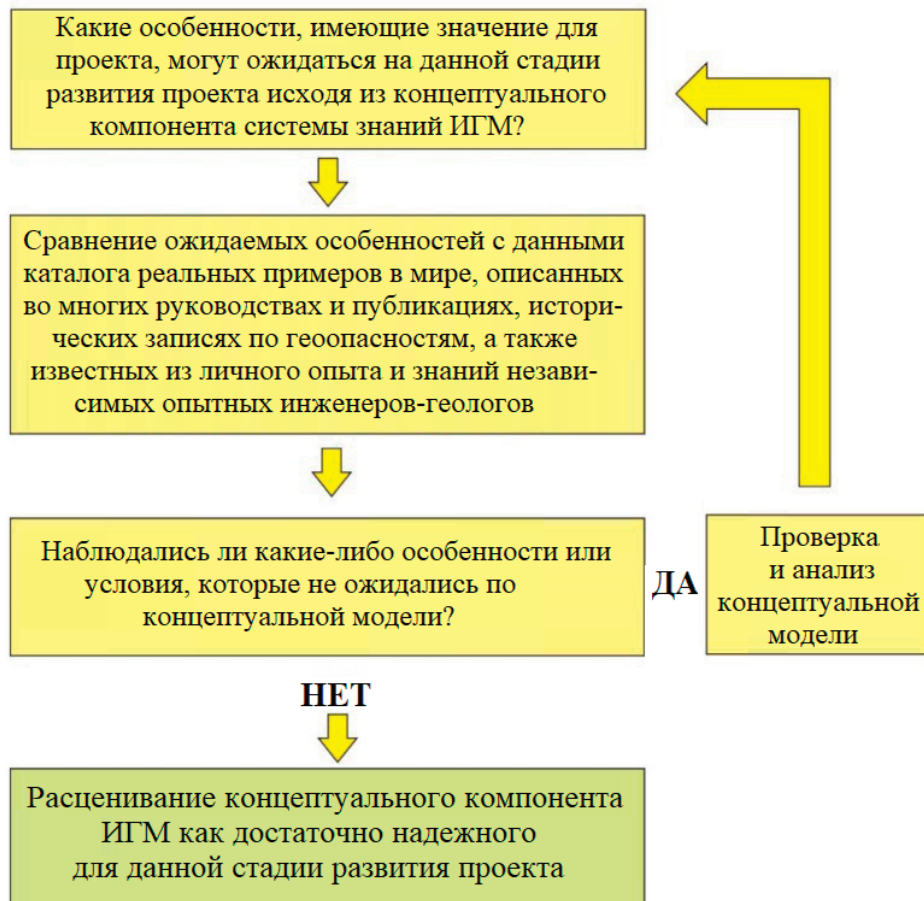


Рис. 1-5. Подход к оценке надежности концептуального компонента ИГМ

- Для проектов уровня 3 в идеале следует использовать группу признанных экспертов – для оценки надежности ИГМ путем независимой проверки и выдачи комментариев относительно содержания, полноты и достоверности проектной документации. Эти эксперты должны быть назначены заказчиком в качестве независимых специалистов.

1.4.4. Другие методы оценки неопределенностей и надежности ИГМ

Для оценки и неопределенности, и надежности ИГМ необходимо провести оценку всей информации, входящей в состав модели. Для наблюдательного компонента ИГМ такие проверки являются относительно простыми и могут проводиться как на количественном, так и на качественном уровне. Однако количественные методы не могут реально помочь в снижении ошибок, влияющих на достоверность, которые возникают из-за неточностей в концептуальном понимании. Только проверяя истинность концепций с помощью качественных подходов, можно оценить этот компонент ИГМ и таким образом подтвердить его уровень надежности.

1.4.4.1. Оценка надежности концептуального компонента

Подход к оценке концептуального компонента ИГМ проиллюстрирован на рисунке 1-5. Этот подход должен применяться на всех этапах проекта отдельными лицами, экспертами-

рецензентами и группами экспертов. Однако основные проверки концептуальной надежности ИГМ на качественном уровне также должны проводиться лицами, участвовавшими в разработке модели. Всякий раз, когда проводятся самоконтроль или внутренняя проверка, их результаты должны документироваться.

1.4.4.2. Оценка надежности наблюдательного компонента – качественные подходы

Надежность наблюдательного компонента ИГМ может быть оценена на качественном уровне с использованием тематических карт и классификации надежности наборов данных.

1.4.4.3. Оценка надежности наблюдательного компонента – полуколичественные подходы

Разработаны различные методы, по которым отдельные составляющие ИГМ оцениваются в баллах, а полученные результаты суммируются для формирования ранговой численной оценки надежности.

1.4.4.4. Оценка надежности наблюдательного компонента – количественные подходы

Количественные оценки ограничиваются анализом наблюдательных компонентов ИГМ. При этом могут быть использованы три семейства инструментов:

- модели случайных полей и метод случайных конечных элементов, при котором используется случайная виртуальная грунтовая среда в сочетании с анализом методом конечных элементов в рамках моделирования методом Монте-Карло;
- геостатистические методы (как стационарные, так и нестационарные, такие как методы кригинга);
- стохастические модели.

С дополнительной информацией можно ознакомиться в части 2 «Комментарии», в разделе 2.4 «Управление неопределенностями ИГМ».

1.5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ИГМ

1.5.1. Проверка качества процесса разработки ИГМ

Надлежащее качество ИГМ обеспечивается при условии соблюдения рекомендаций, представленных в данном руководстве. Контрольный список по обеспечению и контролю качества для проверки их выполнения приведен в таблице 1-6.

Таблица 1-6. Контрольный список вопросов для обеспечения и контроля качества ИГМ	
Ключевые вопросы	Текущее состояние
Сформирована ли эффективная и компетентная команда, включая проверяющего специалиста?	...
Четко ли определены охват и назначение ИГМ?	...
Соответствует ли ИГМ требованиям тендерной документации / техническому заданию?	...
Была ли собрана необходимая инженерно-геологическая информация, имеющая значение для проекта, в ходе предварительных камеральных исследований?	...
Были ли определены соответствующие географические границы и масштаб для представления ИГМ?	...
Была ли задокументирована подходящая концептуальная модель и является ли она обоснованной на основе предварительных камеральных исследований?	...
Были ли исследования грунтовой среды направлены на снижение неопределенностей, определенных в концептуальной модели?	...
Проводились ли наблюдения в ходе изысканий и задокументированы ли они в виде данных?	...
Четко ли определены источники данных, использованных для создания ИГМ?	...
Является ли качество имеющихся данных достаточным для достижения целей разработки ИГМ?	...
Есть ли какие-либо другие потенциально полезные источники данных?	...
Были ли какие-либо данные специально не включены в ИГМ и является ли это обоснованным?	...
Были ли наблюдения увязаны с концепциями? Был ли концептуализирован и интерпретирован диапазон инженерно-геологических условий?	...
Выделены ли инженерно-геологические элементы? Определены ли их инженерно-геологические характеристики?	...
Представлена ли геологическая модель?	...
Представлена ли геотехническая модель?	...
Представлена ли оценка геологических опасностей?	...
Выявлены ли значительные риски, пробелы и несоответствия в системе знаний ИГМ?	...
Представлена ли информация для использования при инженерно-геологическом анализе?	...
Задокументирована ли вся система знаний ИГМ?	...
Представлены ли карты и разрезы, иллюстрирующие инженерно-геологические условия, которые имеют значение для проекта?	...
Указаны ли дополнительные знания, необходимые для усовершенствования ИГМ, снижения рисков, облегчения проектирования или рассмотрения претензий?	...
Если была разработана цифровая 3D-модель, был ли заполнен контрольный список, приведенный в таблице 1-5?	...
Была ли проведена проверка ИГМ квалифицированным и опытным инженером-геологом, компетенция которого соответствует уровню сложности геологических условий и проекта?	...

С дополнительной информацией можно ознакомиться в части 2 «Комментарии», в разделе 2.5 «Обеспечение качества ИГМ».

2. КОММЕНТАРИИ

2.1. ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ ИГМ

2.1.1. Определения

Нет пояснений.

2.1.2. основополагающие принципы

Нет пояснений.

2.2. ПРОЦЕСС РАЗРАБОТКИ ИГМ

2.2.1. Общее представление о процессе разработки

Общая схема процесса разработки ИГМ приведена на рисунке 2-1.

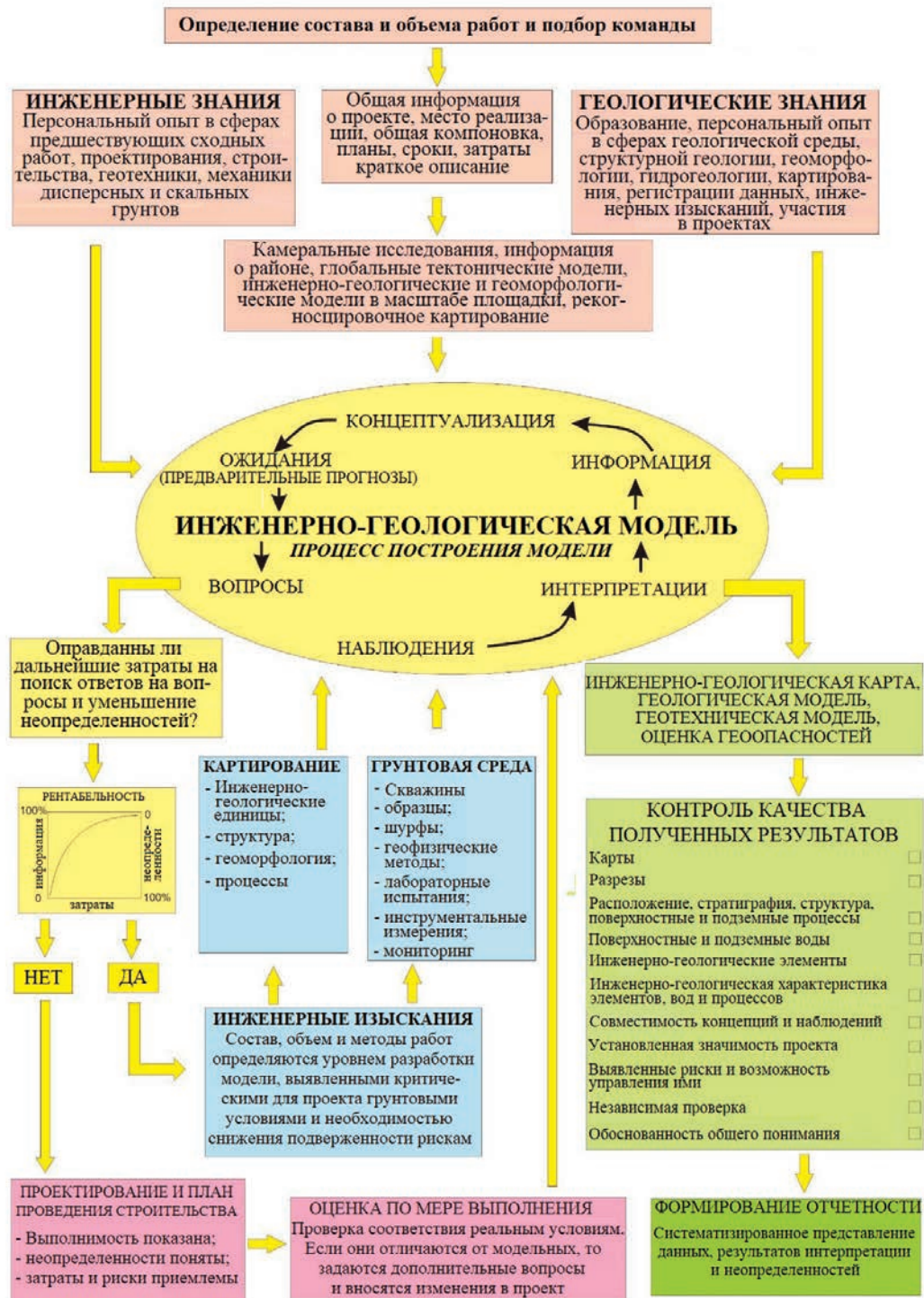


Рис. 2-1. Процесс разработки ИГМ

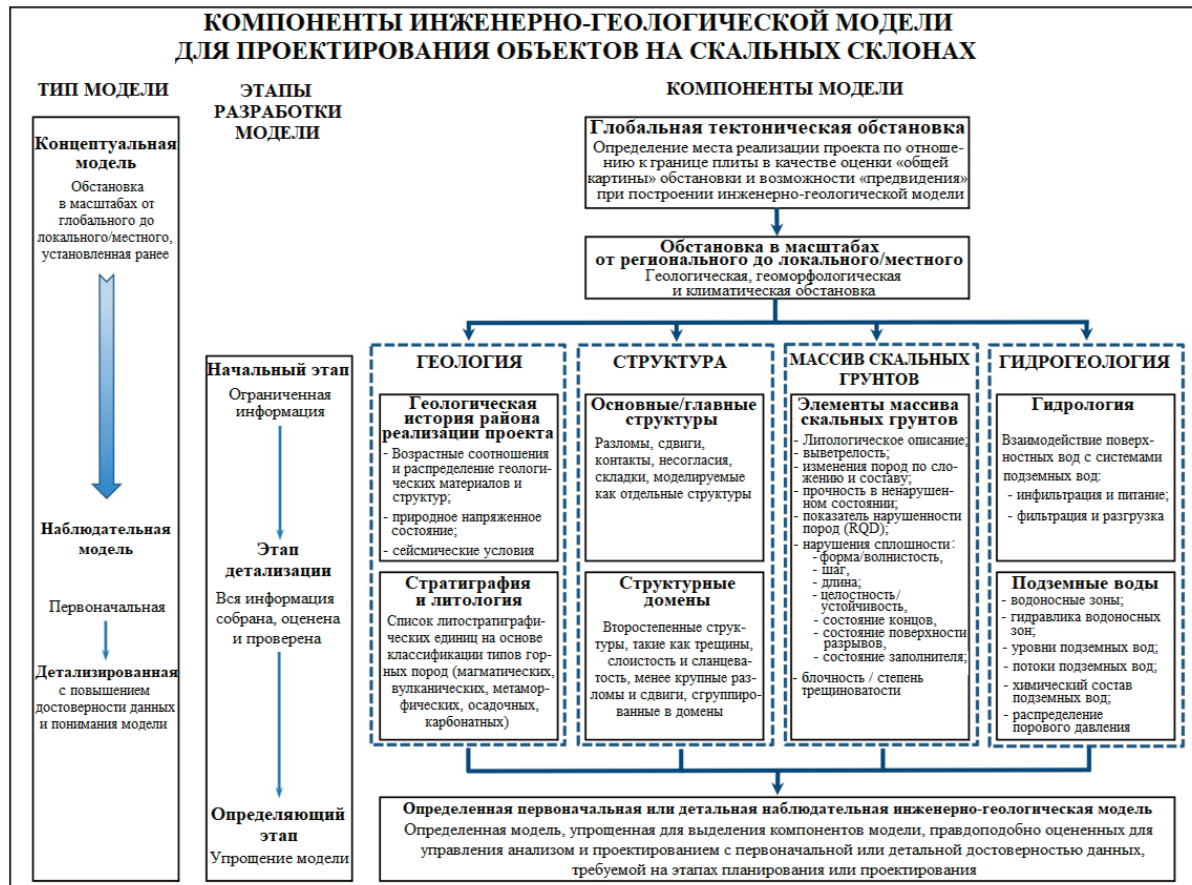


Рис. 2-2. Процесс разработки ИГМ для проектирования объектов на скальных склонах и откосах (по главе Eggers M. EGMs for rock engineering projects в руководстве Baynes, Parry, 2022, указанном в списке литературы)



Рис. 2-3. Процесс разработки ИГМ для проектирования морских сооружений (по главе Waring D. EGMs for offshore studies в руководстве Baynes, Parry, 2022, указанном в списке литературы)

Общая схема процесса разработки ИГМ для проектирования объектов на скальных склонах и откосах представлена на рисунке 2-2.

Общая схема процесса разработки ИГМ для проектирования морских сооружений приведена на рисунке 2-3.

Общая схема процесса разработки ИГМ для понимания механики грунтов представлена на рисунке 2-4.

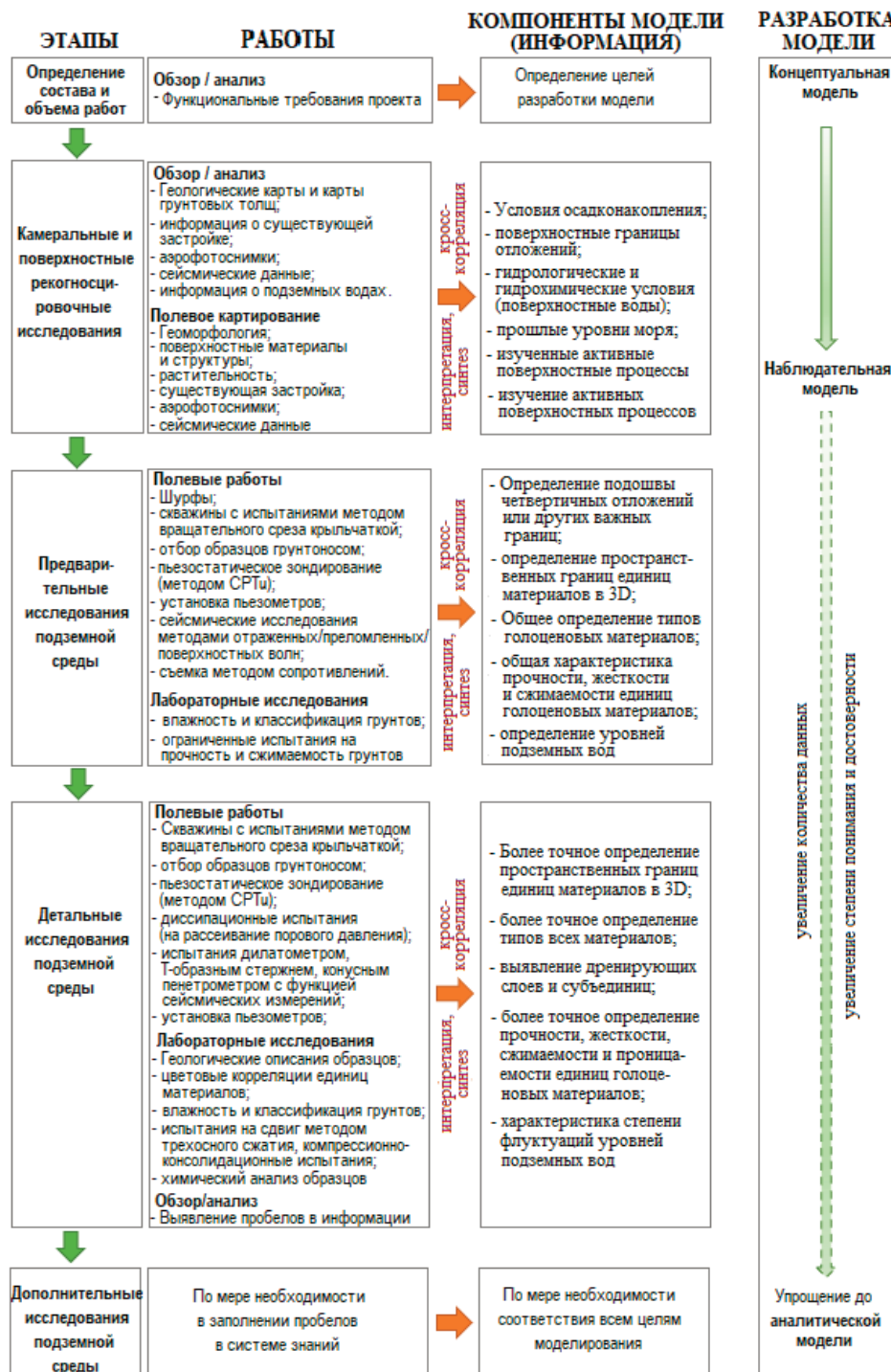


Рис. 2-4. Процесс разработки ИГМ для понимания механики грунтов (по главе Shipway I. EGMs for soil engineering studies в руководстве Baynes, Parry, 2022, указанном в списке литературы)



Рис. 2-5. Процесс разработки ИГМ для небольших проектов (по главе Shipway I. EGMs for small projects в руководстве Baynes & Parry, 2022, указанном в списке литературы)

Общая схема процесса разработки ИГМ для небольших проектов приведена на рисунке 2-5.

2.2.1.1. Процесс разработки

Нет пояснений.

2.2.1.2. Первоначальные шаги

Нет пояснений.

2.2.1.3. Полезные принципы работы при разработке ИГМ

При разработке ИГМ следует применять следующие принципы работы.

- Постоянно подвергайте сомнению концепции, результаты наблюдений и интерпретаций по мере разработки моделей. Будьте гибкими и готовыми изменить свое мнение.
- Важен анализ общей картины: при разработке ИГМ работайте от «дальней зоны» к «ближней зоне», то есть сначала рассмотрите информацию по «дальней зоне» (например, по прошлой и настоящей тектонической обстановке и длительной геологической и геоморфологической истории), а затем используйте эти знания для рассмотрения условий в масштабе исследуемой

площадки, а также участков за ее пределами, для которых требуются оценки. Может потребоваться разработка крупномасштабных моделей на основе исходных мелкомасштабных наборов данных.

- Очень крупномасштабные разработки или создание весьма сложных/комплексных моделей с большими объемами информации могут быть сопряжены с трудностями. ИГМ должна соответствовать сути вопросов проектирования/проекта, но при этом быть достаточно надежной для оценки присущей площадке инженерно-геологической изменчивости, а также любых изменений в проекте, которые могут возникнуть.

- ИГМ также должна учитывать временной аспект – например, скорость протекания геоморфологических процессов и любые потенциальные воздействия на проектируемый объект в течение заданного срока его службы.

- Там, где это известно, предлагаемая застройка, изображенная в соответствующем масштабе, должна быть «наложена» на все планы, разрезы и 3D-визуализации с обязательным учетом любых изменений в проекте, таких как добавление, перемещение или удаление объектов по мере развития проекта.

При разработке ИГМ часто допускаются следующие ошибки.

- Отбрасывание данных или фактов, которые не соответствуют предвзятой модели или противоречат ей. Не следует исключать данные, если не будет доказано, что они в корне ошибочны (в последнем случае, прежде чем исключить, следует попытаться их по-другому интерпретировать). Имейте в виду, что противоречивая информация часто может указывать на геотехническую сложность, не учтенную при разработке концептуальной модели.

- Разработка концептуальных представлений, которые неверны и неадекватны и/или не имеют отношения к проекту.

- Недооценка имеющих отношение к делу исторических данных или информации только потому, что они не зарегистрированы в соответствии с действующими стандартами или были получены на более ранних стадиях развития проекта.

- Использование только данных о подземном пространстве и отказ от инженерно-геологического и геоморфологического картирования поверхности земли.

- Невыполнение сплошного инженерно-геологического картирования площадки и окружающих ее территорий или проведение картирования только в отдельных легкодоступных местах.

- Работа в обратном направлении от причины, результата или решения.

- Использование искаженных или неподходящих масштабов. Сбор данных в масштабе, не соответствующем целям проекта. Применение преувеличенных вертикальных масштабов для поперечных и продольных геологических разрезов (если их использование необходимо, то надо представить также разрез без вертикального преувеличения).

- Стремление включить каждую деталь, не учитывая ее значимость.

- Неучет ситуации за рамками изучаемой площадки или рассматриваемой проблемы.

Например, в отношении геоморфологии проект должен рассматриваться в контексте расположения его площадки в условиях того или иного ландшафта/рельефа.

- Включение данных или информации без указания степени их достоверности.

- Более детальная интерпретация информации, чем позволяют имеющиеся данные.

- Неучет альтернативных вариантов интерпретации и отсутствие информации о них в модели.

2.2.1.4. Навыки, необходимые для разработки ИГМ

Для создания качественных ИГМ необходимы следующие знания и навыки.

- Знания о геологических процессах, условиях формирования скальных и дисперсных пород и условиях их изменений (выветривании, формировании склонов и снятии напряжений), то есть геологические знания.
- Умение мыслить в четырех измерениях (4D), то есть в трех пространственных измерениях и в четвертом измерении – времени.
- Понимание инженерной геоморфологии, в частности геоморфологических процессов с их частотами (во времени) и величинами (объемом, пространственной протяженностью, скоростью возникновения и распространения).
- Понимание реакций грунтов на естественные или антропогенные изменения (то есть инженерно-геологические знания) с точки зрения механики дисперсных грунтов, механики скальных грунтов и гидрогеологии.
- Способность анализировать детали, вписывать их в общую картину, критически оценивать информацию и исключать влияние свойственной человеку неосознанной предвзятости.
- Понимание геологического обоснования и научного метода. Использование как индуктивных рассуждений (процесса проведения простых наблюдений определенного типа и их применения посредством обобщения к решению другой задачи для принятия решения), так и дедуктивных рассуждений (получения выводов на основе логических правил, применяемых к набору предпосылок).
- Опыт в создании реалистичных и успешных ИГМ.
- Понимание того, когда требуется дополнительная, часто специализированная, техническая поддержка. Эта может быть обращение за помощью к коллегам – специалистам в таких сферах, как гидрогеология, геоэкология, геоморфология, геофизика, структурная геология, геологические опасности, грунтоведение, почвоведение, а также в соответствующих инженерных областях, например в геотехнике или проектировании плотин.

2.2.2. Выбор уровня разработки ИГМ

Нет пояснений.

2.2.3. Детали процесса разработки

2.2.3.1. Создание команды, определение состава, объема и цели работ

Разные проекты при реализации на одной и той же площадке требуют разработки разных моделей из-за вариативности потенциальных взаимодействий между геологическими условиями и объектом проектирования.

На рисунке 2-6 проиллюстрировано, насколько существенными будут разные аспекты одних и тех же геологических условий в зависимости от характера проекта – одноэтажного здания (А), автодорожного моста (Б), тоннеля (В). Ожидается, что одноэтажное здание будет оказывать небольшую вертикальную нагрузку на поверхность грунта, сваи автодорожного моста дадут более высокие вертикальные и боковые нагрузки на глубине, а тоннель будет дренировать грунтовые воды и изменит их режим на глубине (по Parry et al., 2014).

2.2.3.2. Сбор необходимой инженерно-геологической информации в ходе предварительных камеральных исследований

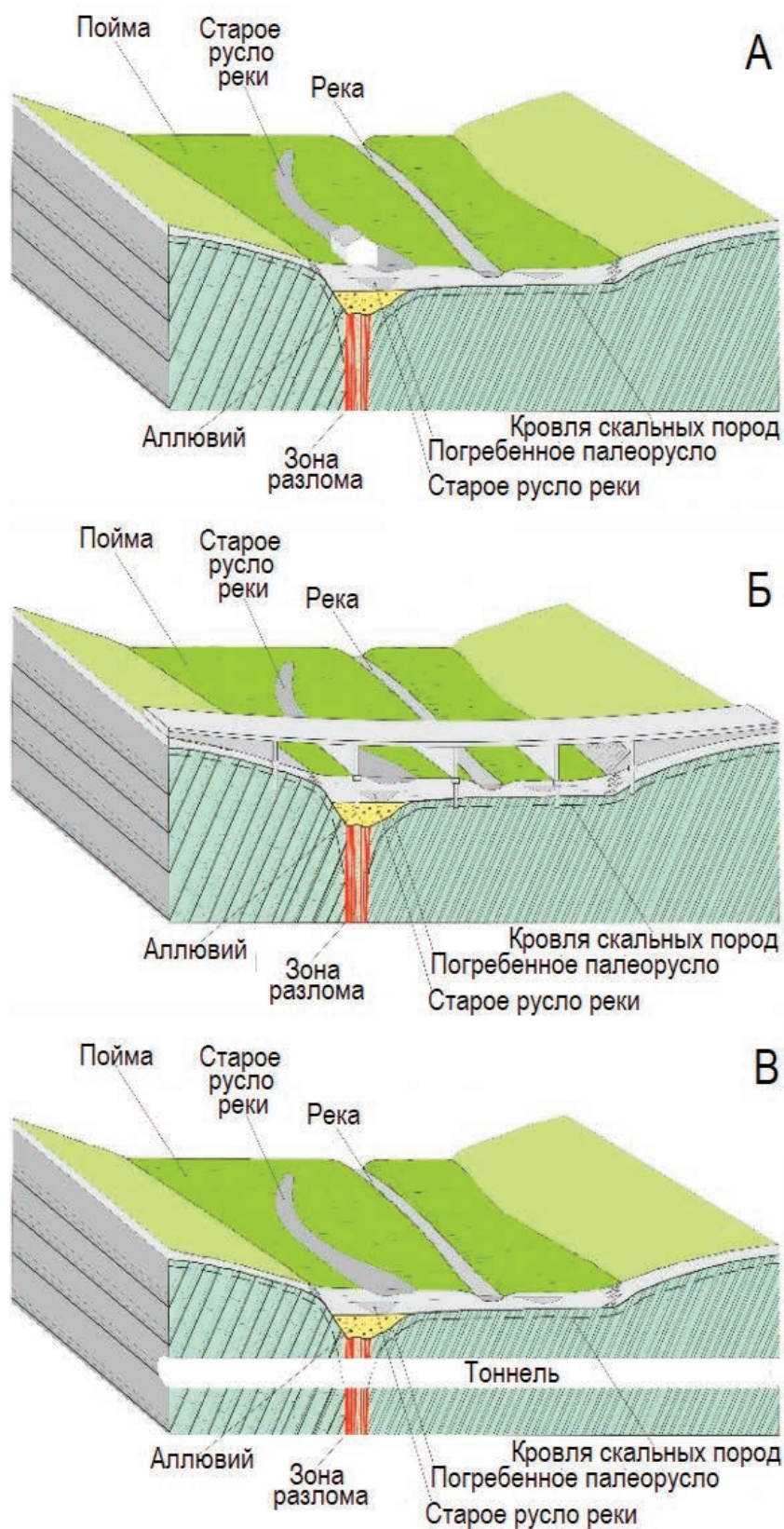


Рис. 2-6. Зависимость ИГМ от типа проекта: А – одноэтажного здания; Б – автодорожного моста; В – тоннеля. Источник (по разрешению): Parry et al., 2014

Типичные источники информации, к которым следует обращаться (при их наличии) в ходе предварительных камеральных исследований, представлены в таблице 2-1.

Таблица 2-1. Источники для предварительных камеральных исследований (по Shilston et al., 2012)	
Предмет исследований	Примеры источников информации
Топография	Карты; аэрофотоснимки; изображения, полученные со спутников или путем аэросъемки; цифровая модель рельефа (ЦМР) или цифровая модель местности (ЦММ), полученные с применением дистанционного зондирования на основе использования лазерного излучения для измерения расстояний до объектов и получения детальной информации об их форме и структуре (съемки лидаром – LiDAR), дистанционного зондирования с помощью интерферометрических радиолокаторов/радаров с синтезированной апертурой (InSAR)
Геоморфология, геология, гидрогеология и инженерная геология	Карты; пояснительные записки и отчеты; аэрофотоснимки; изображения, полученные со спутников или путем аэросъемки (включая изображения с оттененным рельефом, полученные с помощью лидара); опубликованные статьи и книги; материалы/документация по шахтам и карьерам; тематические базы данных; материалы по предыдущим инженерным изысканиям; материалы по использованию подземных вод; данные по региональным геоопасностям, например по сейсмическим опасностям
Окружающая среда и территориальное планирование	Карты территориального планирования; аэрофотоснимки; изображения, полученные со спутников или путем аэросъемки; интернет-сервис Google Earth («Google Планета Земля»); отчеты и карты по городской геологии; материалы по археологическим объектам/площадкам и историческим зданиям; информация по грунтово-почвенным обследованиям; материалы по загрязненным землям; оценки воздействий на окружающую среду (ОВОС/EIA) или экологические обоснования проектов (ЭОП/ОИС); климатические данные; информация о реках и морских побережьях
Условия площадки, землепользование и история	Исторические карты; исторические документы; аэрофотоснимки; цифровые изображения, полученные со спутников или путем аэросъемки (включая полученные с помощью лидара); карты землепользования и территориального планирования; отчеты по инженерным изысканиям; материалы по геотехническим свойствам и геоопасностям; базы данных; данные дистанционного зондирования с помощью интерферометрических радиолокаторов/радаров с синтезированной апертурой (InSAR); результаты картирования, полученные в ходе более ранних строительных работ
Первоначальное посещение/обследование площадки изысканий	– Осмотр площадки и окружающих ее участков «опытным глазом»; – рекогносцировочное обследование площадки для проверки имеющейся информации; – посещение определенных участков
Информация о местных/локальных особенностях	Материалы краеведческих и геологических сообществ; информация о предыдущем использовании площадки; архивная строительная документация; архивы органов строительного надзора; газеты; материалы региональных и федеральных геологических служб; материалы изысканий на прилегающих к площадке участках
Прецеденты	Материалы по случаям из практики; строительная документация
Свод правил, стандарты, нормы и руководства	Профессиональные объединения и институты, государственные ведомства, научно-исследовательские организации, университеты и другие вузы

При любом поиске информации в литературе надо отличать факты от вымысла. Существует множество веб-сайтов, которые содержат информацию, которая потенциально может быть полезной. Однако не всем из них можно доверять в плане надежности представленных данных. Доступ к сайтам, которым можно доверять, имеет определяющее значение, и наиболее подходящей является информация, представленная федеральными, региональными и местными государственными ведомствами и службами, музеями, университетами, научными и профессиональными объединениями, организациями по стандартизации и т.д. (Griffiths, 2019). К веб-сайтам компаний, архивам федеральных и региональных газет и неофициальным свидетельствам следует относиться с определенной долей недоверия.

Для многих крупных проектов при первоначальных камеральных исследованиях приходится использовать карты и разрезы, существующие только в бумажном виде. В связи с этим надо применять следующие основные правила.

- Убедитесь, что, насколько это возможно, установлены все источники данных и архивных материалов. Это может потребовать значительных усилий, поскольку архивные записи часто неполны и хаотичны. Могут возникнуть вопросы по конфиденциальности и авторскому праву.
- Убедитесь, что системы координат и условные нули отсчета высот во всех старых материалах поняты и увязаны с системой координат и условным нулем отсчета высот, которые используются в ИГМ, и должным образом задокументированы. Для пространственной оценки всех материалов, используемых для предварительных камеральных исследований и поиска закономерностей в этих данных, неоценимы геоинформационные системы (ГИС).

2.2.3.3. Концептуализация ИГМ

Основополагающей стратегией при разработке концептуальной основы моделирования должно быть понимание всей геологической истории исследуемой площадки (Fookes et al., 2000). Эта стратегия основана на той предпосылке, что инженерные характеристики грунтовой среды являются результатом полной геологической истории места будущей реализации проекта, включая последующую антропогенную модификацию.

Концептуализация также дает возможность четко сформировать более глубокое понимание возможных геологических воздействий на проект на основе знаний и опыта в отношении аналогичных геологических условий, материалов, процессов, типов проектов или уровней их сложности. Формирование и развитие этого понимания является центральным при разработке ИГМ и происходит на протяжении всего жизненного цикла проекта. Такой концептуальный подход позволяет создавать гипотетические модели, которые потенциально обладают относительно высокой степенью неопределенности, напрямую связанной с типом и объемом существующих данных, а также со знаниями и опытом участников моделирования.

Концептуальные модели могут быть следующими:

- характерными для конкретных площадок, обеспечивающими основу для интерпретации данных наблюдений и позволяющими прогнозировать грунтовые условия, которые могут присутствовать на площадке;
- типовыми/обобщенными, не зависящими от конкретного расположения площадки и предоставляющими информацию, например об общих климатических или структурно-геологических условиях;
- эволюционными (временными), иллюстрирующими то, как изменялись грунтовые условия на протяжении геологического времени.

Наборы данных, перечисленные в таблице 2-1, могут быть использованы для интерпретации информации, имеющей отношение к создаваемой ИГМ. Источники этой информации перечислены и описаны далее.

Топографические карты:

- географическое положение и, следовательно, современные климат и землепользование;
- первоначальное геоморфологическое картирование;
- структурные линеаменты;
- основные водотоки и другие водные объекты;
- антропогенные изменения – нанесенные на карту карьеры, свалки, шахтные стволы, насыпи, выемки и т.д.;
- возможные поверхностные отложения с характерными формами рельефа, такими как поймы рек, ледниковые выносы, лёссовые отложения, оползни и т.д.

Геологические карты, отчеты, пояснительные записки, публикации:

- геологические карты обычно показывают распределение хроно- и литостратиграфических единиц – именно поэтому стандартная геологическая карта требует значительной интерпретации, прежде чем лечь в основу инженерно-геологической карты;
- литологическая информация: соответствующие единицы являются основными структурными элементами ИГМ, поэтому рассмотрение условий их формирования может дать представление о возможных вариациях в литологических особенностях, которые могут присутствовать, но не нанесены на карту; знание данных по литологии также поможет определить типы, ориентацию возможных разрывных нарушений и расстояния между ними, а также типы и геометрию внешних границ (геологических контактов) как геологических единиц, так и субъединиц внутри них;
- стратиграфическая информация (возраст): позволяет оценить взаимосвязи между геологическими единицами и последующими процессами модификации скальных/дисперсных грунтов (например, диагенетическими изменениями, тектоническими изменениями, выветриванием, формированием твердых корок и т.д.);
- закартированные геологические структуры (например, складчатость и разломы), позволяющие оценить их возможное воздействие на массив скальных пород (например, образование связанных со складкообразованием трещин, зон влияния разломов, которые, в свою очередь, влияют на глубину выветривания);
- четвертичные отложения: следует отметить, что они могут не отображаться на картах или отображаться только при превышении некой установленной мощности (например, в Великобритании поверхностные отложения толщиной менее 1 м обычно не отображаются на геологических картах, а если отображаются, то часто со значительными упрощениями);
- геологические границы, часто с указанием степени неопределенности (например, наблюдаемые, предполагаемые, интерпретированные);
- антропогенная модификация: работы, связанные с обогащением полезных ископаемых, формированием отложений насыпного, намывного или выработанного грунта, созданием свалок, шахт или штолен;
- старые карты: хотя следует использовать самые последние геологические карты соответствующего масштаба, может возникнуть необходимость обратиться к более старым картам, поскольку на них могут быть показаны важные особенности (например, заброшенные горные выработки или сооружения), не показанные на более поздних картах; отображаемая

геологическая обстановка может меняться с каждым поколением карт по мере пересмотра геологических парадигм, поэтому может быть полезным разобраться в том, почему это так.

Аэрофотоснимки, изображения, полученные при дистанционном зондировании Земли

Картирование с использованием аэрофотоснимков, результатов съемки бортовыми мультиспектральными сканерами, спутниковых изображений значительно помогает в разработке концептуальных идей. В то время как возможность получения конкретных изображений может быть ограниченной, сервис Google Earth предоставляет изображения практически всей поверхности Земли. Результаты картирования должны отражать следующее (но не ограничиваться этим):

- геоморфологическую обстановку;
- проявления прошлых и современных геоморфологических процессов и вероятных скоростей их изменений (например, реликтовые признаки перигляциальных процессов и современные врезы рек);
- конкретные геологические структуры и общее геологическое строение;
- поверхностные рыхлые грунты, или реголиты (с использованием интерпретации данных многоспектральных спутниковых наблюдений для определения литологии и минералогии глин);
- обнажения, а в некоторых случаях и результаты предварительной интерпретации литологических особенностей поверхности (с использованием данных многоспектральных спутниковых наблюдений);
- антропогенные изменения.

Результаты лидарной съемки

В некоторых странах общедоступны изображения, полученные с помощью лидаров (LiDAR), но для многих проектов проводится лидарная съемка конкретных площадок. Используя ЦМР, можно создавать изображения с оттененным рельефом, которые можно интерпретировать для получения информации:

- по геоморфологическим особенностям (например, по оползням, бывшим речным руслам и т.д.);
- для определения границ обнажений;
- для картирования поверхности земли;
- по главным структурно-геологическим особенностям;
- по человеческой деятельности и/или для археологических исследований.

Имеющиеся данные наземных исследований

Для многих проектов могут использоваться уже имеющиеся данные исследований. С этими данными может быть связана разная степень неопределенности в зависимости от их возраста. Следовательно, такую информацию, возможно, придется интерпретировать еще до концептуализации.

-

В ходе сбора всей необходимой информации процесс концептуализации должен систематично развиваться по следующим направлениям.

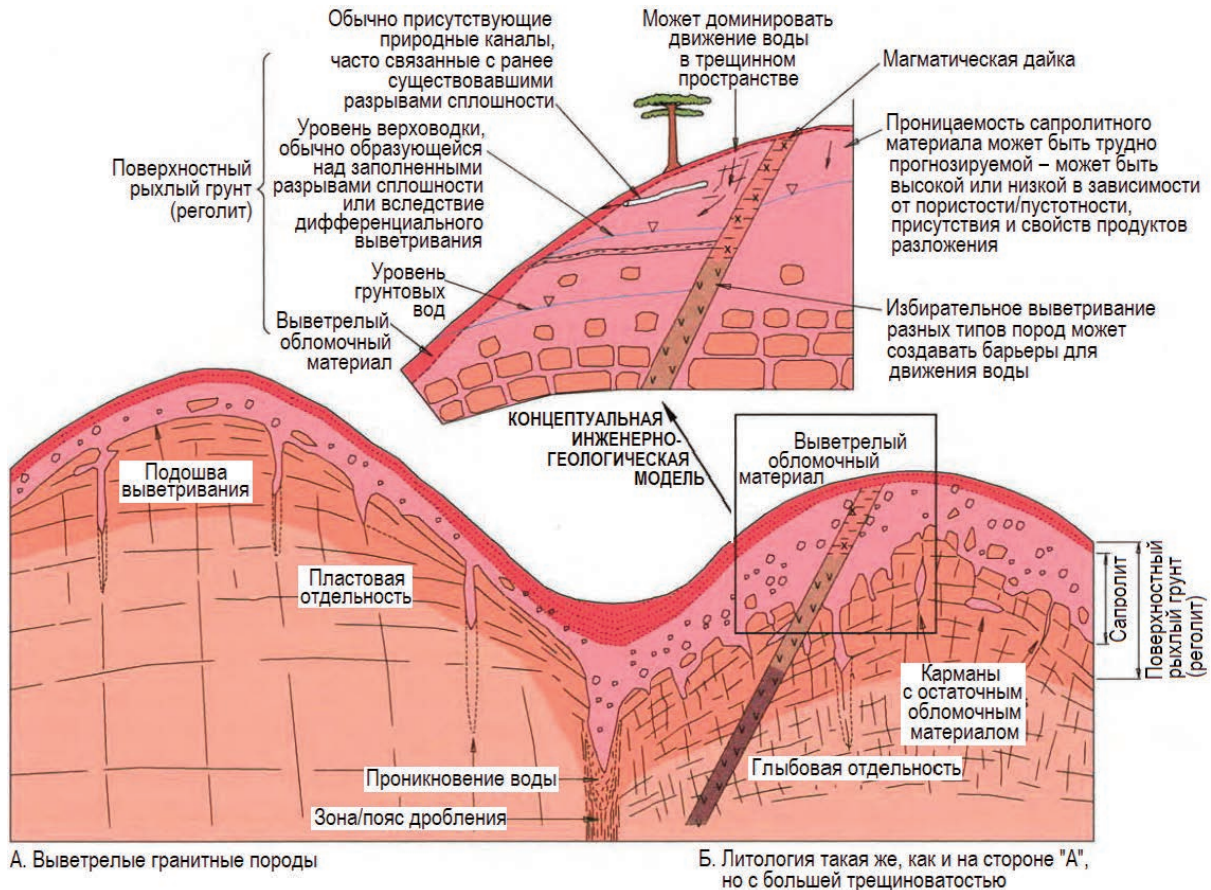


Рис. 2-7. Типичные характеристики гранитного массива (по Fookes et al., 2015)

2.2.3.3.1. Окружающая обстановка

Общий контекст для концептуализации обеспечивают глобальные/региональные сводки по геологическим и геоморфологическим условиям, тектонической (геодинамической) обстановке, климате в настоящем и в прошлом, соответствующим процессам формирования ландшафтов/рельефа, природным напряжениям и т.д.

2.2.3.3.2. Стратиграфия: типы скальных и дисперсных грунтов и их взаимосвязи

Информацию о типах дисперсных и скальных грунтов, слагающих исследуемую территорию, и о стратиграфических взаимосвязях между этими единицами можно извлечь из геологических карт. Она также часто отображается на карте в виде стратиграфической схемы. Знания, полученные с помощью геологических карт, помогают разработать концептуальную модель, которая прогнозирует наличие определенных геологических единиц (и определенных особенностей), характер их границ, пространственные взаимосвязи между ними и т.д. То есть геологическая карта и любые сопутствующие пояснительные записки, другие записи или отчеты могут быть использованы для определения общей геологической истории. Эта часть концептуализации основана на фундаментальных геологических знаниях о различных типах горных пород и об инженерном значении их характерных особенностей. С геологической точки зрения существует множество различных типов пород, но для инженерно-

геологических целей обычно достаточно упрощенных классификаций по большинству стандартов по описательным характеристикам грунтов. Первоначально тип этого оценивания будет основываться на опыте и ссылках на соответствующую литературу, в частности на типовые модели и сводки инженерно-геологических характеристик. С визуализацией различных типовых концептуальных моделей можно ознакомиться в следующих публикациях: Fookes et al., 2015; Fell et al., 2015. Для примера на рисунке 2-7 показаны ожидаемые условия для сложенной гранитами территории, подвергшейся глубокому химическому выветриванию.

2.2.3.3.3. Геологическое строение

Вероятная структура может быть экстраполирована на основе геологической карты или знаний и опыта в отношении сходных геологических условий. То, чего можно ожидать, опять же лучше всего спрогнозировать, рассмотрев соответствующие типовые концептуальные модели (например, рис. 2-8).

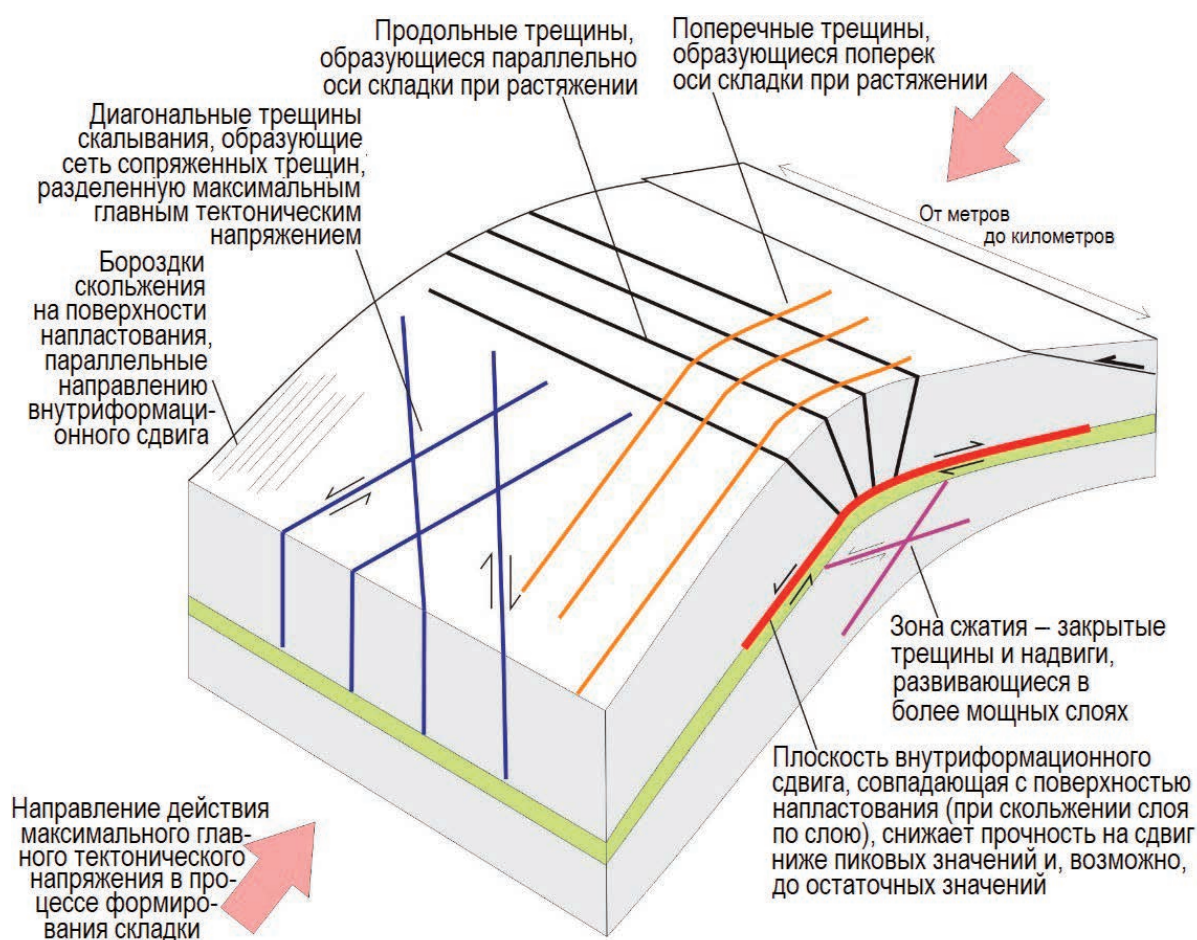


Рис. 2-8. Структуры, связанные с образованием открытой складки (по Price, Cosgrove, 1990)

2.2.3.3.4. Поверхностные и подповерхностные процессы

Чтобы оценить, какие процессы могли происходить в прошлом, а также какие процессы активны или могли бы снова активизироваться при реализации проекта (например, снятие

напряжений при работах в долине может повлиять на устойчивость склона, проницаемость массива горных пород, режим движения подземных вод и притока в тоннели), требуются знания и опыт в сферах геологии и геоморфологии.

Как правило, эти исследования включают классификацию предполагаемых процессов и сбор информации об их скоростях. Пример того, как система знаний, разработанная для оползней, которые воздействуют на площадку будущей реализации проекта или представляют потенциальную угрозу для нее, можно представить в форме, подходящей для оценки опасности (рис. 2-9).

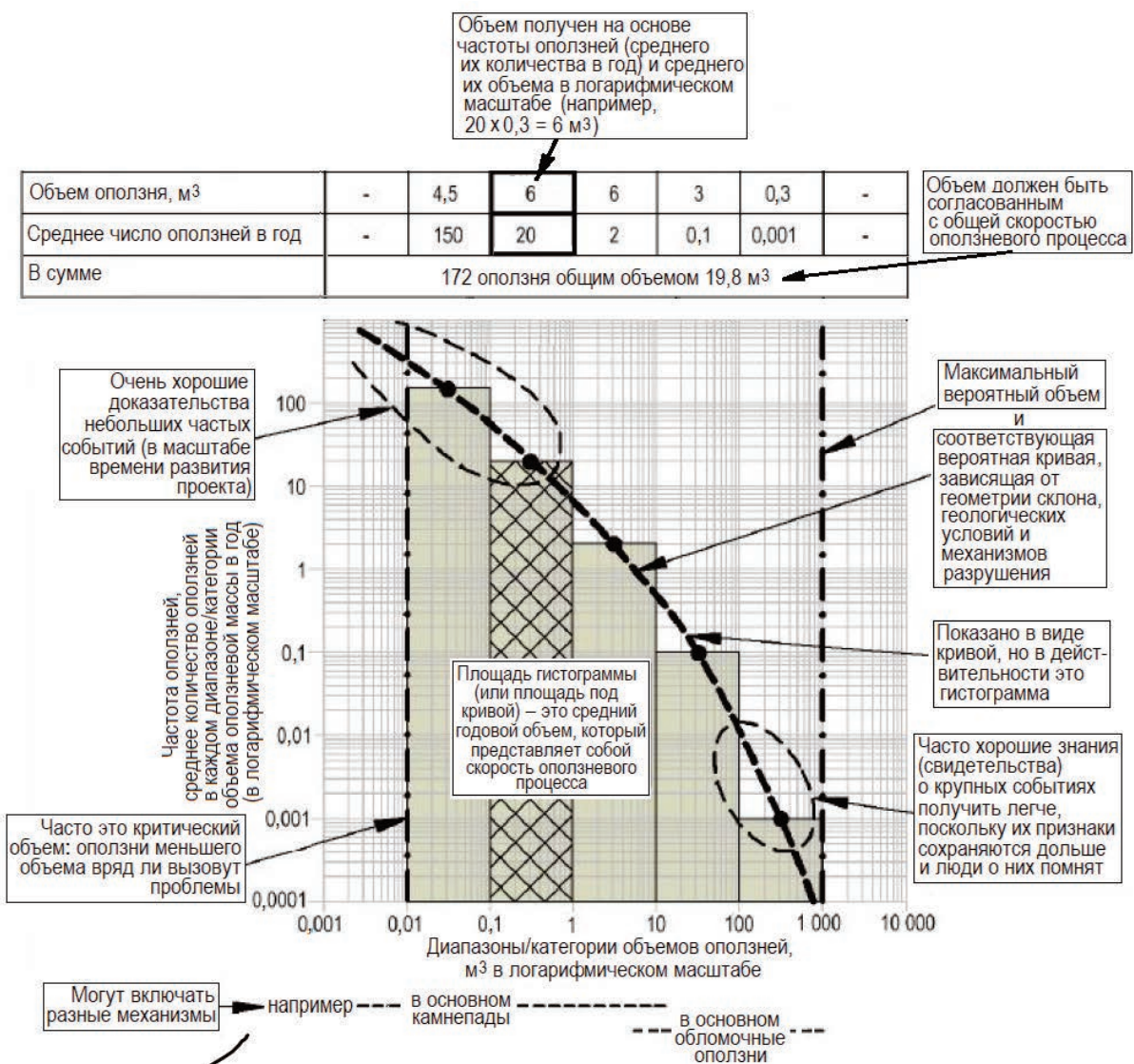


Рис. 2-9. Типовая модель частоты оползней (по Moon et al. 2005)

При любых исследованиях ландшафта следует учитывать концепцию «палимпсеста» (буквально слово «палимпсест» означает старинную рукопись, которая была нанесена поверх ранее написанных и удаленных текстов). В большинстве случаев ландшафты характеризуются сочетанием реликтовых и активных компонентов и процессов, возникших в различных условиях окружающей среды.

В результате ландшафт может содержать комбинацию из:

- реликтовых форм рельефа, на которые не влияют современные процессы;
- реликтовых форм рельефа, на которые влияют современные процессы или которые могли бы снова стать активными при изменении условий;
- активных форм рельефа.

Концептуальная модель должна объяснять эволюцию современного ландшафта и прогнозировать то, как проект может повлиять на ландшафт или наоборот. Чтобы понять возможные геоморфологические процессы, полезно разработать типовую концептуальную модель морфогенетических форм рельефа, характерных для изучаемой территории, – идентифицируемых совокупностей форм рельефа, которые являются результатом влияния различных типов климата в течение определенного периода времени. Типовые концептуальные модели могут помочь в создании концептуальных моделей для конкретных площадок. Они также предоставляют контрольный список типов особенностей и геоопасностей, которые могут встретиться на этих площадках. Ознакомиться с визуализациями различных типовых концептуальных моделей рельефа можно в работе Fookes et al., 2015.

2.2.3.3.5. Первоначальные инженерно-геологические характеристики

На основе знаний и опыта можно задокументировать возможные инженерно-геологические характеристики различных компонентов концептуальной модели.

В многочисленных публикациях обобщены типичные инженерно-геологические характеристики различных материалов. Например, свойства скального массива, сложенного гранитами и гнейсами разной степени выветрелости были обобщены в работе Dearman et al., 1978. При наличии обширной существующей информации и богатого опыта можно по описаниям скального массива первоначально оценить характеристики, такие как прочность и жесткость, с помощью различных методов, например подхода на основе использования геологического индекса прочности (GSI – Geological Strength Index) (Hoek, Brown, 2019). Однако должны быть полностью задокументированы неопределенности, связанные с таким подходом.

В дополнение к первоначальным реестрам рисков, для генерации первоначальных базовых условий, которые определяют ожидаемые условия для проекта в соответствии с контрактом, можно использовать концептуальную модель (Baynes et al., 2005).

2.2.3.3.6. Первоначальная геологическая модель

В зависимости от проекта исходная/первоначальная геологическая модель может включать значительный объем существующих данных наблюдений или почти полностью основываться на концептуализации – следовательно, неопределенности этой модели могут в значительной степени варьировать. Однако по мере дальнейшей разработки геологическая модель обеспечивает логическую основу для планирования инженерных изысканий, которые должны быть направлены на снижение неопределенностей.

2.2.3.3.7. Пример концептуализации

Пример визуализации концептуальной модели представлен на рисунке 2-10.

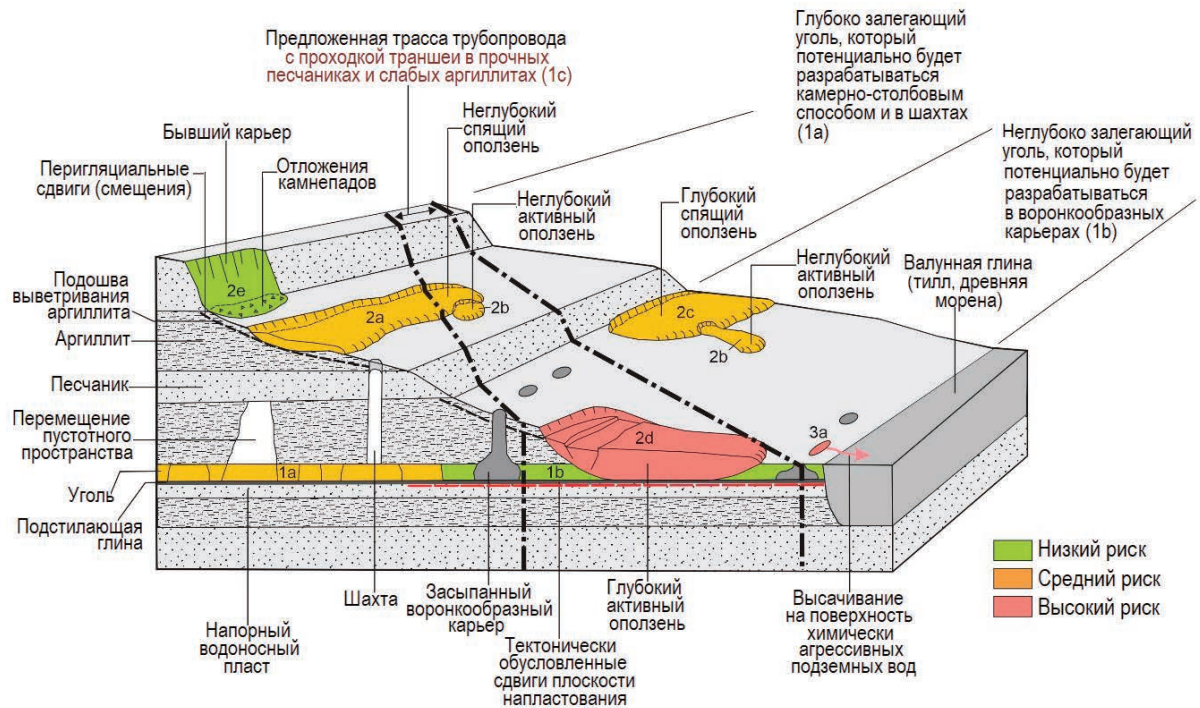


Рис. 2-10. Визуализация концептуального компонента ИГМ участка перехода трубопровода через нестабильный грунт в зоне влияния горных работ и оползневых процессов, выполненная после предварительного камерального изучения (по Baynes et al., 2021)

2.2.3.4. Получение данных наблюдений для территории будущей реализации проекта при инженерных изысканиях

Регистрация данных по грунту производится в соответствии с национальными стандартами или международными рекомендациями (руководствами). Однако, если записи делаются по минимальным стандартам, это может приводить к ограничениям и потере результатов наблюдений. Поэтому необходима гибкость в системах регистрации данных, чтобы сосредоточить сбор информации на ключевых факторах, которые (как прогнозируют концептуальная модель или более ранняя модель наблюдений) с наибольшей вероятностью будут влиять на проектирование.

Геологическая интерпретация условий залегания и/или стратиграфического возраста должна сопровождаться описаниями всех материалов в журналах наблюдений по скважинам, шурфам, обнажениям и т.д. (в соответствии с требованиями австралийского стандарта AS1726 2017), поскольку она указывает на то, когда и как были сформированы геологические материалы, что, в свою очередь, отразится на их технических характеристиках. Однако это требует от интерпретатора глубокого понимания принципов ИГМ. Возможна неверная интерпретация, поэтому важно указать степень ее достоверности.

Изыскатели должны интерпретировать результаты текущих наблюдений и определять, какие дополнительные параметры или участки требуют изучения, на основе увеличивающегося количества получаемых данных и эволюции их интерпретации. Очевидно, что в этом вопросе преимущество имеют более опытные эксперты. Если изыскателю предоставить ИГМ до проведения дальнейших наблюдений, то вероятность правильной интерпретации значительно

возрастет. Кроме того, тогда будет легче распознать, задокументировать и оценить выбросы и аномалии.

Следует отметить, что интерпретация полевых данных может измениться с появлением дополнительных данных или знаний/опыта и по мере развития ИГМ может возникнуть необходимость в переоценке информации, полученной из более ранних полевых записей и журналов. При этом внесение изменений в интерпретацию должно быть задокументировано.

Несмотря на переход в настоящее время к вводу данных в цифровом виде, это сделать не всегда просто. Например, записи при исследованиях сложных грунтов со сложными взаимосвязями не всегда поддаются оцифровке для ввода. В таких случаях необходимо представить оригиналы полевых журналов с рисунками, выполненными карандашом на бумаге.

Детальное картирование может проводиться с использованием множества методик – от простых измерений расстояний от контрольных точек с помощью рулетки до определения расположения мест наблюдений на цифровой модели рельефа высокого разрешения (при ее наличии) или на ортофотоснимках.

2.2.3.5. Объединение в ИГМ концептуальных и наблюдательных моделей

До сих пор интерпретация традиционно включала создание бумажных карт, разрезов, рисунков и текстов, но теперь она все чаще выполняется в среде цифровых моделей. Она включает в себя «интерпретацию по поверхности» во время разработки цифровой 3D-модели, когда для интерпретации грунтовых условий сопоставляются и используются инженерно-геологические карты, геоморфологические карты, материалы лидарной съемки, результаты топографической съемки, полевого картирования и наблюдений и т.д. Важно, чтобы такая интерпретация была подтверждена в полевых условиях.

Полевое инженерно-геологическое и геоморфологическое картирование редко выполняется в рамках проектов как нечто само собой разумеющееся, однако в рассматриваемом случае требуется одновременное проведение как полевых наблюдений, так и концептуальной интерпретации, что позволяет получить типичную 2D-визуализацию ИГМ в виде карты.

2.2.3.6. Определение и характеристика инженерно-геологических элементов

Нет пояснений.

2.2.3.6.1. Геотехническая сложность

Нет пояснений.

2.2.3.7. Инженерно-геологическое описание

Нет пояснений.

2.2.3.7.1. Зонирование

Нет пояснений.

2.2.3.8. Неопределенности, пробелы и несоответствия в ИГМ

Нет пояснений.

2.2.4. ИГМ и Еврокод

В последней версии Еврокода 7, части 2 (которая готовилась к внедрению в апреле 2023 года) описывается подход к исследованиям и проектированию геотехнических компонентов проекта. В работе Норбери (Norbury, 2020) отмечено, что в Еврокоде 7 описано два разных типа моделей:

- 1) модель грунтовых условий (Ground Model по EN 1997-2:2004), которая включает геологическую обстановку, представление и оценку результатов испытаний;
- 2) геотехническая модель (Geotechnical Model по EN 1997-1:2004), которая охватывает проектирование сооружения и, таким образом, включает в себя выбор геотехнических параметров для проектирования.

Хотя терминология отличается, подход Еврокода соответствует общему подходу в отношении ИГМ для проектов гражданского строительства. Однако он не очень приемлем для более широкого спектра принятия геотехнических решений, которые часто принимаются за рамками проектирования для гражданского строительства (например, при изучении геологических опасностей в море, оценке ресурсов карьеров, подготовке базовых геотехнических отчетов и т.д., когда общий подход в отношении ИГМ более эффективен).

Отсюда можно вернуться назад к разделу 1.2. «ПРОЦЕСС РАЗРАБОТКИ ИГМ»

2.3. КОМПОНОВКА И ПЕРЕДАЧА ИГМ

2.3.1. Введение

Нет пояснений.

2.3.2. Краткое описание документации по компонентам ИГМ

Нет пояснений.

2.3.3. Значение для контракта на проектирование

Нет пояснений.

2.3.4. Представление отчета по ИГМ

ИГМ в основном документируются посредством отчетов по проектам. В тех частях мира, где судебные разбирательства часто бывают связаны с контрактами на крупные проекты, традиционно (а часто и в качестве контрактного обязательства) после проведения инженерных изысканий составляются два основных типа отчетов – отчеты по данным и интерпретационные отчеты. Первые обычно рассматриваются как основанные на данных, а вторые часто могут иметь ограниченное интерпретационное содержание, обычно «только для информации», и имеют меньший вес в контрактах. В таких обстоятельствах эффективная система знаний ИГМ может быть не представлена или не полностью использована в жизненном цикле проекта.

2.3.4.1. Отчет по данным

В некоторых случаях владельцы предпочитают предоставлять только данные (то есть журналы испытаний скважин, результаты лабораторных испытаний и т.д.), полагая, что предоставление любых интерпретаций каким-то образом увеличит подверженность проекта геотехническим рискам. Считается, что это общепринятая практика, но непредоставление интерпретаций проектировщикам или подрядчикам, привлеченным к работе далее, может только снизить их способность приемлемо предвидеть грунтовые условия, с которыми они могут столкнуться, что заставит их закладывать эти риски в стоимость своих тендерных предложений.

2.3.4.2. Интерпретационный отчет

Интерпретационные отчеты редко документируют концептуальные компоненты ИГМ и обычно представляют только так называемую модель грунтовых условий без объяснения того, как она была получена и есть ли связанные с ней неопределенности. Эти проблемы усугубляются тем, что подрядчики, выполняющие наблюдения во время инженерных изысканий, часто отвечают за передачу данных, а консультанты, которые, возможно, никогда не были на площадке изысканий, отвечают за интерпретационную составляющую. Такое разделение в изысканиях может привести к неправильной и вводящей в заблуждение интерпретации данных по грунтовым условиям.

2.3.4.3. Базовые геотехнические отчеты

При составлении базовых геотехнических отчетов в настоящее время все чаще используются интерпретационные отчеты с целью более четкого распределения рисков на основе контрактного закрепления интерпретации грунтовых условий (Davis, 2017). Международной федерацией инженеров-консультантов (FIDIC – International Federation of Consulting Engineers) предложены сборники типовых контрактных документов, в том числе «Краткая форма контракта» («Зеленая книга» – Emerald Book), специально разработанная для использования базовых геотехнических отчетов (FIDIC, 2019).

Базовый геотехнический отчет разграничивает риски между нанимателем/заказчиком и подрядчиком путем включения отчетности («базовой отчетности»), в которой определены представляющие интерес инженерно-геологические или геотехнические условия, с которыми может столкнуться подрядчик во время строительства, и те условия, которые считаются учтенными при проведении тендера.

Базовый геотехнический отчет также может предоставить сбалансированную интерпретацию грунтовых условий на основе имеющихся данных. Либо он быть рассчитан на более хорошие или более плохие условия в зависимости от профиля рисков клиента и его готовности к риску. Различия в фактических грунтовых условиях, встреченных на площадке, и в их влиянии на контракты обычно рассматриваются с помощью независимой третьей стороны в ходе строительных работ. Базовый геотехнический отчет может включать несколько отчетов, состав и содержание которых постепенно согласовываются в ходе переговоров по условиям контракта.

В своей простейшей форме базовый геотехнический отчет используется всеми участниками тендера в качестве общей основы для денежной оценки геотехнических рисков наряду с оценкой стоимости работ, указанных в тендерных графических материалах и технических условиях на получение подряда. При заключении контракта считается, что подрядчик, выигравший тендер, предусмотрел диапазон грунтовых условий, указанный в базовых данных отчета. Эти данные определяют то, что считается «предвиденным», и служат контрактным критерием для оценки того, что может быть заявлено как «непредвиденное» в отношении грунтовых условий, выявленных в ходе строительства.

Затем, после заключения контракта, базовый геотехнический отчет используется для оценки обоснованности любых претензий о возмещении убытков, связанных с грунтовыми условиями, в пределах охваченных этим отчетом вопросов. Система знаний ИГМ поддерживает развитие таких связанных с условиями контракта компонентов отчета, как численные базовые данные, характеристические значения и описание базовых грунтовых условий.

2.3.4.4. Инженерно-геологические карты и разрезы

Инженерно-геологические карты и разрезы являются основополагающей частью системы знаний ИГМ. На всех картах и разрезах должны быть приведены масштаб, легенда и компасная стрелка, указывающая направление на север. Также надо, чтобы на них можно было различить результаты наблюдений и интерпретаций с использованием линейных условных знаков (например, рис. 2-11). При составлении цифровых карт аналогичным образом должны проводиться различия между интерпретированными, спрогнозированными данными и результатами наблюдений.

Значительная часть инженерно-геологических знаний появилась еще до появления компьютерных технологий и цифровой визуализации геологических данных. Они отражались в

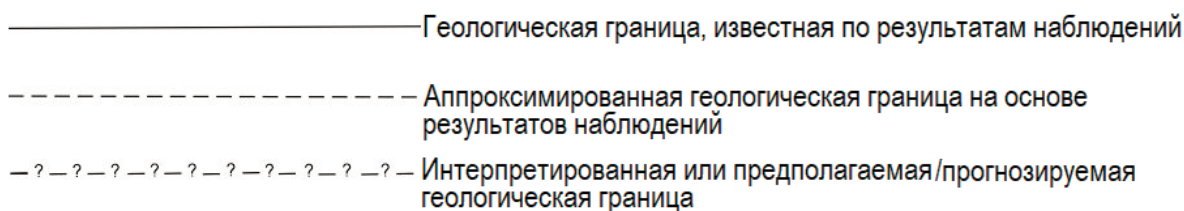


Рис. 2-11. Линейные условные знаки для геологических карт и разрезов

виде традиционных «статичных» продуктов, таких как рисунки, чертежи, диаграммы, графики, фотографии, карты, разрезы и физические модели. Однако во многих проектах эти традиционные методики по-прежнему способствуют концептуализации и проверке достоверности цифровой 3D-модели и, особенно в случае небольших проектов, могут быть ключевыми выходными продуктами разработки ИГМ.

В большинстве крупных проектов задействованы большие объемы данных и современные методы получения этих данных в электронном виде, поэтому обработка информации с помощью компьютеров будет наиболее эффективным и, вероятно, единственным практичным способом сопоставления данных.

Представляется возможным, что машинное обучение будет становиться все более важным/необходимым для интерпретации/обработки больших данных, получаемых при инженерных изысканиях путем мультисенсорного дистанционного зондирования (лазерного сканирования лидаром, фотограмметрической, тепловизионной, гиперспектральной съемки), с помощью скважинной аппаратуры и мониторинга (например, с использованием георадиолокатора/радар, интерферометрического радиолокатора с синтезированной апертурой – InSAR, регистрации сигналов акустической и микросейсмической эмиссии). Но такая перспектива вызывает опасения относительно способности машинного обучения концептуализировать и интерпретировать данные геологически обоснованным образом.

2.3.4.4.1. Данные 2D-картирования

2D-визуализация геологических данных обычно обрабатывается в геоинформационной системе (ГИС), которая идеально подходит для сопоставления различных типов геопространственных данных. При этом данные представляются в ГИС в виде отдельных слоев. Следует обратить внимание, что можно создавать простые геологические карты и разрезы с помощью систем автоматизированного проектирования (САПР), но эти системы больше подходят для инженерного проектирования и, как правило, не обладают функционалом, необходимым для создания хороших геологических чертежей.

Архитектура слоев ГИС должна отражать различные источники данных, и по возможности следует отличать слои по данным наблюдений от слоев по результатам интерпретации. Типичные слои ГИС для ИГМ показаны на рисунке 2-12.

2.3.4.4.2. 2D-разрезы

В дополнение к картам будет необходимо построить 2D-разрезы на основе интерпретации данных, содержащихся в ИГМ. Эти разрезы надо будет использовать в качестве информации для дальнейшего анализа, проектирования, строительства или в качестве инструментов

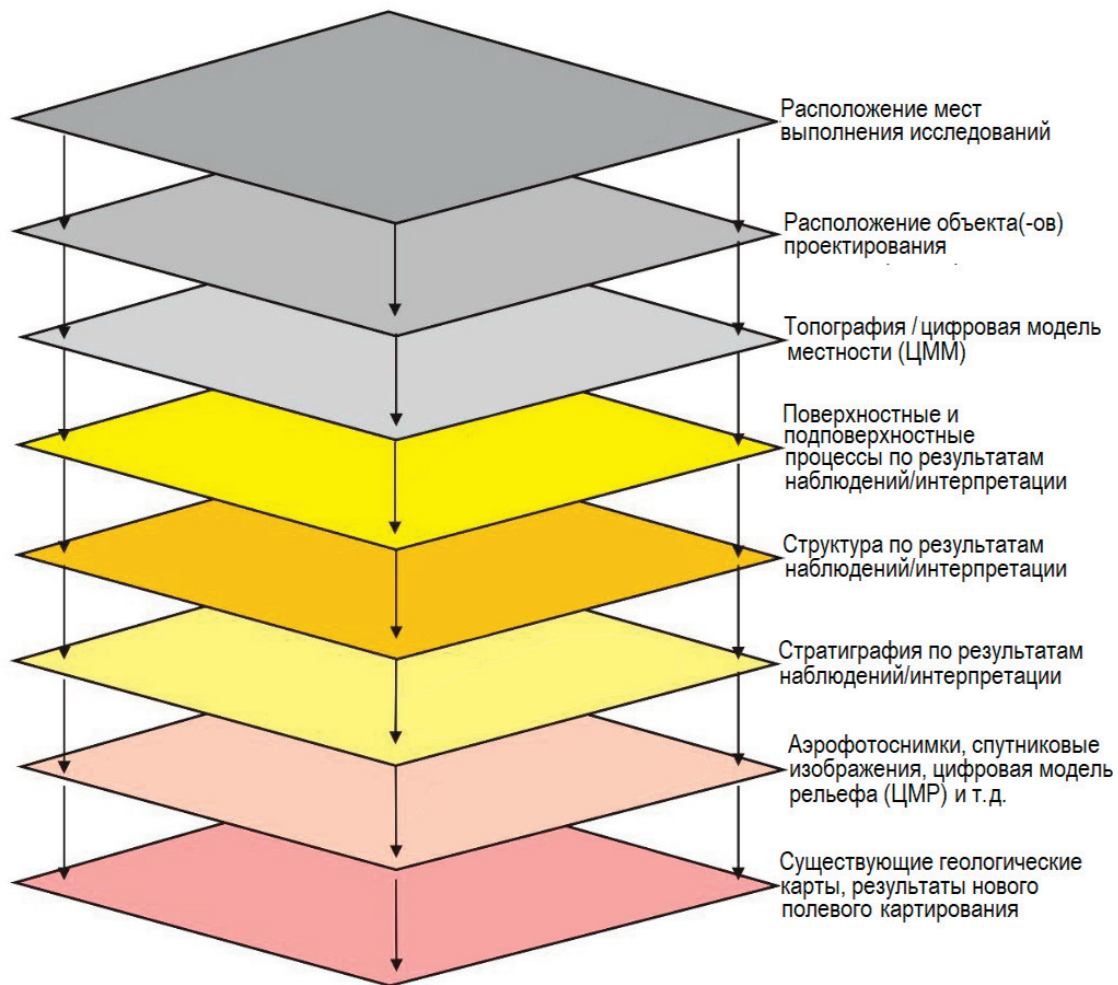


Рис. 2-12. Архитектура ГИС для ИГМ

визуализации. Поперечные и продольные разрезы могут быть выполнены от руки или с помощью программного обеспечения для 2D- или 3D-моделирования. В 2D-программах разрезы могут быть построены в цифровом виде пользователем, в то время как 2D-разрезы, экспортированные из цифровых 3D-моделей, могут быть сгенерированы автоматически при определении пользователем нужной линии разреза. Независимо от способа создания разрезов должны соблюдаться одни и те же основные принципы, которые рассмотрены ниже.

- Разрезы должны проходить там, где они могут наилучшим образом проиллюстрировать взаимосвязь между компонентом проекта, нагрузками или изменениями, создаваемыми под воздействием этого компонента на грунт, и имеющимися данными (информацией), которые могут помочь в интерпретации инженерно-геологических единиц. Расположение разрезов может быть выбрано проектировщиками для изучения воздействий конкретных нагрузок в конкретных случаях.

- Если данные проецируются на разрез, надо указать принятые допущения и метод проецирования.

- Разрезы надо строить перпендикулярно контурным линиям или интересующему объекту, если нет необходимости в чем-то ином (например, если нужен продольный разрез вдоль линейного объекта или вдоль направления смещения).

- Разрезы должны проходить через осевые линии критических элементов проекта, для которых нужен наилучший контроль (то есть данные), а данные, на которых основан разрез, должны быть на нем задокументированы. Если наилучший контроль требуется не вдоль осевой линии, то для размещения разреза в соответствующем месте необходима экспертная оценка, которая может потребовать дополнительных линий разрезов.
- Вертикальный масштаб разреза (если он не мешает визуализации) должен быть таким же, как и горизонтальный (то есть без вертикального преувеличения). В случае использования увеличенного вертикального масштаба необходимо также представить разрез без такого увеличения.
- Условные обозначения инженерно-геологических элементов должны соответствовать тем обозначениям, которые используются в модели и/или на карте.

Цифровые 3D-модели обычно не могут отображать пунктирные границы или включать вопросительные знаки на поверхностях, поэтому часто бывает трудно понять, где границы являются прогнозируемыми или предполагаемыми (аппроксимированными). Одним из методов, помогающих это определить, является интеграция в пространство 3D-модели схем разрезов и карт, поскольку они могут включать вышеупомянутые линейные условные знаки.

2.3.4.4.3. Что необходимо учитывать относительно пространственной протяженности и масштаба

Пространственный охват карт и планов, являющихся документальными источниками информации в системе знаний ИГМ, должен зависеть от размера территории, которая может быть затронута проектом (например, от горизонтальных размеров участка, на котором грунт будет реагировать на нагрузку от фундамента), а также от площади территории, которая может повлиять на проект (например, территории за пределами места строительства, на которой может возникнуть оползень, способный повлиять на проект). Следовательно, эти документы могут варьировать от региональных карт до планов отдельных обнажений или оснований (пятен будущей застройки).

Масштаб представления карт и планов должен соответствовать масштабу, в котором были собраны данные. Если готовятся обычные разрезы и карты, то уровень детализации любого конкретного изображения должен соответствовать тому, что может быть различимым в масштабе этого изображения при его просмотре в полном размере (в целом). В случае цифровых 3D-моделей масштаб может быть динамическим (то есть меняться при увеличении или уменьшении изображения). Поэтому крайне важно, чтобы при определении уровня детализации, который будет необходимо представить, учитывалось влияние масштаба, выбранного для демонстрации данных.

Следует проявлять осторожность и документировать ограничения, если для создания модели с более высоким разрешением используются данные, собиравшиеся в масштабах с более низким разрешением. Например, изменение масштаба границ на основе карты масштаба 1:100 000 до масштаба 1:5000 на инженерно-геологическом плане проекта может привести к получению недостоверных моделей, особенно без каких-либо полевых верификаций и корректировок.

Следует отметить, что масштаб требуемых выходных данных может меняться на различных этапах развития проекта, но масштаб входных данных останется неизменным и может ограничить пути и способы разработки ИГМ.

2.3.4.4.4. Стереографическое представление

Этот метод может быть использован для оценки особенностей нарушений/структур в грунтовых массивах и того, как/где они изменяются в пространстве. Следовательно, этот инструмент важен для оценки и представления информации о структурах и для любой ИГМ, используемой для участков, где имеет значение геометрия разрывов сплошности (например, трещин, разломов, кливажа). Особенно большое значение он имеет для строительства горных предприятий, но также может применяться и для других строительных проектов, имеющих дело с взаимодействием с грунтовыми массивами, в которых есть нарушения. Следует отметить, что стереографические данные представляют геометрию систем нарушений для части инженерно-геологического элемента, зоны или домена либо определенной системы нарушений, но не представляют геометрию или реальное пространственное расположение этих конкретных дефектов. Такое представление лучше всего достигается путем использования изолиний.

2.3.5. Создание и визуализация цифровой 3D-модели

Цифровые 3D-модели могут давать информацию о подповерхностных условиях так, как ранее было невозможно при подходе «карандаш и бумага». Для больших наборов данных такие модели позволяют тщательно проводить верификацию и интерпретацию данных и гораздо лучше поддерживают интеграцию выходных данных ИГМ в другие дисциплины. Программное обеспечение для цифрового 3D-моделирования позволяет визуализировать широкий спектр данных наблюдений (бурения, статического зондирования, лидарной съемки, геофизических исследований, пьезометрических измерений, картирования границ и т.д.) вместе с результатами интерпретаций границ инженерно-геологических элементов как поверхностей, причем все это создается в единой среде цифрового моделирования. На основе этих поверхностей можно рассчитывать трехмерные тела (объемы), которые воспроизводят инженерно-геологические элементы в 3D-пространстве.

Однако разработка цифровой 3D-модели сопряжена с опасностями, если не будут поняты и задокументированы ограничения, в частности принятые допущения, в модели и численных методах. Цифровые 3D-модели могут быть представлены с гораздо большими кажущимися точностью и определенностью, чем это имеет место на самом деле, – и важно, чтобы такие неопределенности были указаны. Пространственная цифровая модель сама по себе не является ИГМ, поскольку она не отражает систему знаний. Разработка цифровых 3D-моделей должна выполняться или курироваться и верифицироваться квалифицированными инженерами-геологами, обладающими необходимыми знаниями, причем согласованно с разработкой других компонентов ИГМ. В противном случае есть риск создания неточных, некорректных и геологически необоснованных (то есть недостоверных/ненадежных) моделей.

Обширная монография по цифровому геологическому моделированию представлена в работе Turner et al., 2021.

2.3.5.1. Программное обеспечение для моделирования

2.3.5.1.1. Выбор подходящего программного обеспечения

При выборе программных пакетов следует учитывать такие аспекты, как:

- назначение модели (для этого может потребоваться, чтобы программное обеспечение позволяло визуализировать как инженерные сооружения, так и инженерно-геологические особенности);
- этап проектирования (на разных этапах развития проекта могут потребоваться разные инструменты и/или уровни детализации);
- вероятный размер и сложность модели (представлена ли геологическая обстановка простой слоистой структурой или сложной системой складок и/или разломов?);
- размеры наборов данных (для работы с большими наборами данных могут подходить автоматизированные, то есть предусмотренные в программе, инструменты в отличие от трудоемкой ручной работы по интерпретации и манипулированию данными, которая возможна для небольших наборов данных);
- гибкость моделирования (ручные модификации и контроль данных и поверхностей позволяют разработчику модели как можно лучше создавать геологически обоснованные и реалистичные объекты, насколько это возможно);
- требования к обновлению цифровой модели (будут ли требоваться частые обновления модели и, если да, то какие инструменты есть в программном пакете для ограничения объема переделок/реинтерпретаций);
- пространственная неопределенность (можно ли использовать программный пакет для статистического и/или вероятностного анализа изменчивости и неопределенности в наборах данных и модели в целом);
- функциональность и простоту использования (какие методы анализа доступны, какой пользовательский интерфейс, какие навыки требуются для работы, какова эксплуатационная сложность, какова совместимость с имеющимися программными моделями);
- может ли программный пакет выдавать выходные данные как в 2D-, так и в 3D-виде для получения нужной информации при том или ином виде анализа, помогать в прозрачной интеграции с другими дисциплинами, а также предоставлять инструменты коммуникации для принятия инженерных и связанных с ними решений;
- будет ли программный пакет доступен для использования сотрудникам организации с имеющимися у них навыками; кто из них будет разрабатывать, проверять и пересматривать цифровую 3D-модель; обладают ли они надлежащим пониманием относительно использования этого программного обеспечения и его функциональности, а также инженерно-геологическими знаниями и соответствующим опытом, связанными как с типом проекта, так и с грунтовыми условиями;
- специализированные 3D-модели могут разрабатываться с учетом того, что для анализа нужен определенный тип выходных данных; для создания моделей такого типа могут потребоваться специальные программные методы моделирования, которые, вероятно, будут ограничиваться формированием выходных данных для очень ограниченного набора аналитических методов;
- будет ли требоваться совместный доступ к цифровым моделям (кто сможет их редактировать, а кто – только просматривать; как это будет контролироваться; с какими другими моделями надо будет взаимодействовать).

2.3.5.1.2. Моделирование в САПР

Для создания 3D-визуализаций инженерно-геологических условий возможно использование систем автоматизированного проектирования (САПР). Однако такие системы не обладают

топологическими инструментами, что может привести к непредвиденному пересечению границ пластов, особенно в случаях тонких или прерывистых слоев. И в результате придется решать такую серьезную задачу, как корректировка модели в программном пакете. Кроме того, САПР не предназначены для ввода и обработки широкого спектра доступной для проекта инженерно-геологической информации. К тому же они обычно используют геологически нереалистичные прямые границы, а также могут не иметь подходящей символики.

Моделирование геологических условий в САПР не рекомендуется, хотя эти системы можно использовать для того, чтобы моделировать простые инженерно-геологические условия, обычно ограничиваясь 2D-картами и разрезами. Однако применение САПР является одним из основных способов передачи модели, поскольку именно в такой системе геологическая модель интегрируется с элементами проекта.

Таким образом, хотя моделирование с использованием системы автоматизированного проектирования и не рекомендуется, САПР является полезной платформой для передачи модели.

2.3.5.1.3. Программное обеспечение для явного моделирования

При явном моделировании разработчик вручную определяет характер и распределение поверхностей, ограничивающих инженерно-геологические элементы, а данные изысканий, на которых основана интерпретация, представляются в трехмерном виде. Явное моделирование – это то, что считается традиционным ручным методом создания каркасной модели и преобразования ее в цифровую форму. Разработчик модели интерпретирует данные изысканий, а затем определяет поверхности, которые ограничивают инженерно-геологические элементы.

Пример выходных данных программного пакета для явного моделирования представлен на рисунке 2-13.

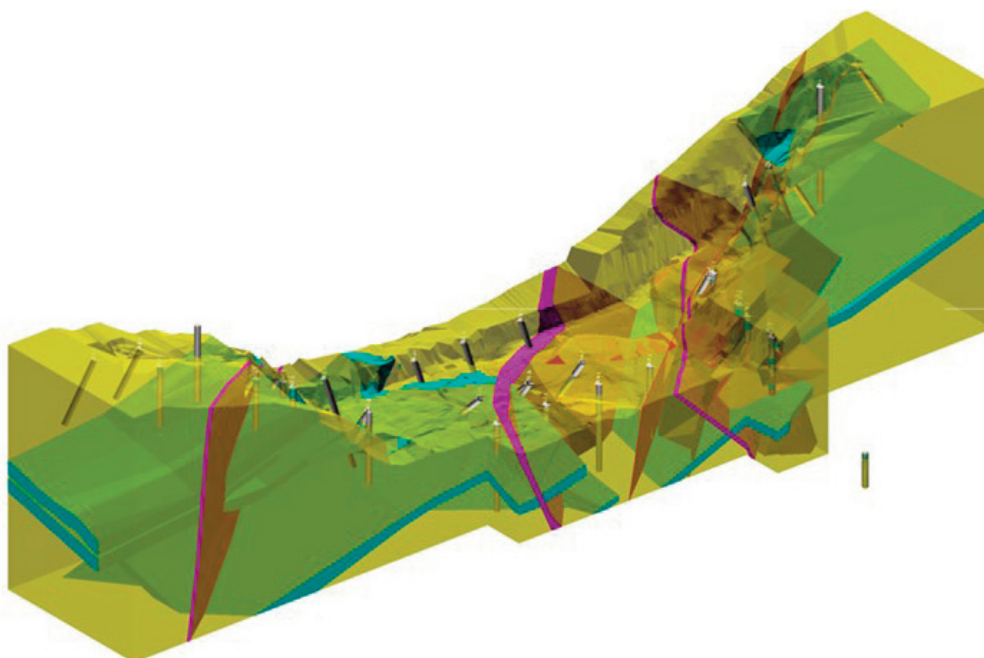


Рис. 2-13. Визуализация геологического строения грунтового основания бетонной гравитационной плотины, включающего пологопадающий пласт андезитов и зоны разломов, прорванные поздними фельзитовыми дайками (изображение предоставлено Ричардом Брехауссом (Richard Brehauss) и воспроизведено с его разрешения)

2.3.5.1.4. Программное обеспечение для неявного моделирования

При неявном моделировании программное обеспечение реализует определенные пользователем алгоритмы для интерполяции и экстраполяции между точками данных. Выходные данные определяют распределение атрибутов, характеризующих инженерно-геологические элементы. Такое распределение может быть непрерывным или определяться границами. Это позволяет создавать более сложные формы поверхностей по сравнению с явными моделями. Однако необходимо оценивать полученные результаты, чтобы убедиться, что моделирование дает геологически обоснованные формы (на основе имеющихся данных по инженерно-геологическим условиям и соблюдения принципов геологии).

Пример выходных данных программного пакета для неявного моделирования представлен на рисунке 2-14.

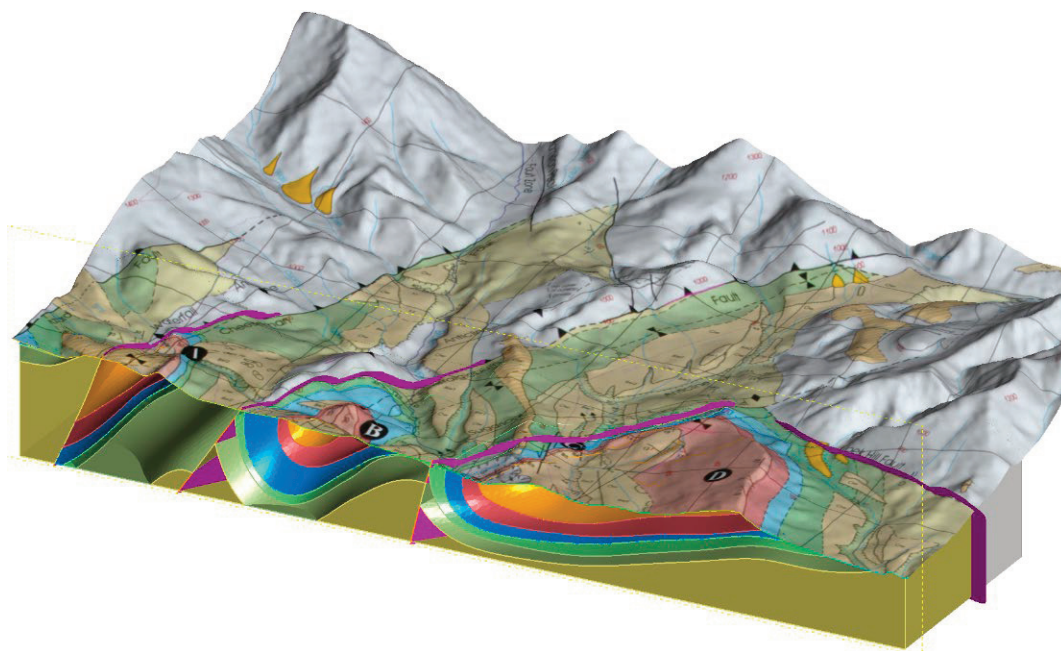


Рис. 2-14. Неявная модель, разработанная на основе наземных наблюдений с использованием алгоритмов для проектирования подповерхностных границ (изображение предоставлено Пэтом Макларином (Pat McLarin) и воспроизведено с его разрешения)

Там, где представляет интерес субстратиграфическая неоднородность, каркасная модель может быть дискретизирована с формированием трехмерной регулярной сетки (состоящей из трехмерных ячеек – вокселей). Вокселям могут быть присвоены показатели свойств материала, такие как электрическое сопротивление, проницаемость, пористость, прочность на сдвиг и т.д., определенные на основе геостатистических алгоритмов. Эти воксельные представления могут использоваться для создания конечноразностных или конечноэлементных сеток для расчетов и моделирования.

2.3.5.1.5. Сравнение явных и неявных цифровых моделей

Для разработки цифровых 3D-моделей могут использоваться как явные, так и неявные методы, причем они часто могут объединяться. Современные программные пакеты для неявного

моделирования обычно имеют функциональные возможности и для явного моделирования, облегчающие уточнение поверхностей. Независимо от метода моделирования, требуются инженерно-геологические знания и использование соответствующих геологических принципов. При надлежащем моделировании оба метода приведут к созданию надежных моделей со схожими интерпретациями. В таблице 2-2 приведены преимущества и ограничения каждого подхода.

Таблица 2-2. Сравнение явных и неявных моделей		
Группа сравнительных характеристик	Явные модели	Неявные модели
Преимущества	- Явные модели могут быть настолько простыми или сложными, насколько выберет разработчик; - не обязательно требуются специализированные программные приложения; - разработчик модели может определять «сквозные» объекты и геологические структуры, такие как разломы, путем их явного отображения на равномерно размещенных разрезах и их соединения; - можно вручную выполнять преобразования в цифровую форму путем отдельных интерпретаций разрезов по всей площадке и последующего объединения для создания псевдоразрезов; - в качестве альтернативы разработчик модели может использовать специализированное программное обеспечение для обработки пространственных данных, ограничивающих единицы, и манипулирования ими, а также для соединения границ для формирования каркаса поверхностей; - таким образом, полученная модель представляет собой «функцию» поверхностей, построенных вручную; - для сглаживания поверхностей и придания им большей реалистичности могут использоваться дополнительные (произвольные) точки между реально наблюдавшимися местами контактов	- Можно быстро создавать и анализировать 3D-модели для визуализации и тестирования нескольких сценариев; - можно осуществлять динамическое моделирование с быстрыми обновлениями модели по мере получения и ввода новых данных; - можно обрабатывать большие и разнообразные наборы данных на персональном компьютере; - можно сохранять разные версии на определенных стадиях разработки модели (в определенные моменты времени) для исследования альтернативных гипотез; - можно моделировать изограды непосредственно по скважинным данным без разделения на домены и без вариографии; - можно создавать множество воспроизводимых моделей, которые основаны на самих данных, а не на интуиции разработчика (следует отметить: подразумевается, что для оценки обоснованности полученных моделей необходимо также использовать геологическую оценку); - многие программные комплексы для неявного моделирования позволяют явно редактировать поверхности
Недостатки и ограничения	- Ручная оцифровка может занимать много времени; - окончательная модель является результатом интерпретаций ее разработчика и может не быть воспроизводимой другими разработчиками; - трудно количественно оценить неопределенности модели; - по мере поступления новой или иной информации модель может не обновляться автоматически, поэтому редактирование может занимать больше времени, чем для неявных моделей	- Документирование особенностей работы модели или наличие хорошо задокументированного контрольного следа (прослеживаемости изменений информации) от модели назад к исходным необработанным данным может оказаться трудной задачей, поэтому важно строго регистрировать ключевые входные данные; - в цифровых моделях остаются неопределенности и необходимо прикладывать усилия для количественной оценки или выяснения источников и последствий (воздействий) неопределенностей; - алгоритмы интерполяции могут быть трудными для независимого воспроизведения и верификации

2.3.5.1.6. Моделирование слоистого геологического строения с использованием ГИС

В инженерных и экологических проектах обычно встречается слоистое геологическое строение на глубинах до 100–200 м. Цифровая модель в таком случае может быть создана путем размещения ряда поверхностей друг над другом. Этот метод позволяет использовать унаследованные сетчатые поверхности, разработанные с помощью инструментов ГИС или на основе цифровых записей скважинных данных и интерпретированных инженерно-геологических разрезов. Его использование привлекательно и эффективно для создания моделей при моделировании зон с относительно недеформированными осадочными толщами. Однако представление разломов, которые нарушают простую последовательность расположения поверхностей, может быть трудной задачей.

2.3.5.1.7. Дискретные системы трещин

Дискретная система трещин (ДСТ) – это модель, которая явно представляет геометрические свойства каждой отдельной трещины (например, ориентацию, размер, расположение, форму, апертуру/раскрытие) и топологические взаимосвязи между отдельными трещинами и группами трещин. Модель ДСТ может быть получена на основе материалов инженерно-геологического картирования, подходящей фотограмметрии с соответствующим анализом ее результатов или с помощью стохастического моделирования. Все эти данные предназначены для отображения различных типов трещин в скальных грунтах, включая трещины растяжения/разрыва, трещины сдвига, трещины-жилы и трещины напластования. Дискретные системы трещин, возможно, придется интерпретировать на основе имеющихся данных или расчетной модели грунтового массива, поскольку часто не все разрывы сплошности в скальном массиве можно наблюдать в трехмерном виде с достаточным разрешением во всех масштабах. Расчетные модели трехмерного массива трещиноватых скальных пород создаются на основе совокупности групп нарушений, параметры которых определяются с использованием статистических распределений вероятностей, полученных при картировании и скважинных наблюдениях. Полученная в результате расчетная модель может быть использована для проведения вероятностного анализа устойчивости склона, тоннеля и т.д.

2.3.5.1.8. Модели подземных вод, распространения загрязнений и тепловых потоков

Целый ряд цифровых моделей может использоваться для того, чтобы прогнозировать, как меняются во времени:

- влияние гидрогеологических изменений (например, при откачке грунтовых вод или при ирригационных работах) на поведение водоносного слоя;
- движение подземных вод в естественных условиях и их химический состав (такие модели подземных вод позволяют предсказать «судьбу» и распространение химических веществ в природных, городских или гипотетических условиях);
- тепловые потоки в грунтовой среде (с помощью таких моделей пытаются предсказать закономерные изменения температуры грунта с глубиной).

Все эти модели разрабатываются на основе подходящей атрибутивной трехмерной цифровой модели с соответствующим образом заданными атрибутами и четкими ограничениями. Затем для прогнозирования изменений во времени используются дифференциальные уравнения, которые часто могут быть решены только приближенными методами с использованием численного анализа.

Эти типы моделей надо калибровать. Это выполняют, многократно запуская модель и изменяя ее (ее параметры) до тех пор, пока не будет достигнуто близкое соответствие ее результатов с реально наблюдавшимися данными.

2.3.5.2. Источники данных и управление

Исходные данные для инженерно-геологического описания могут быть получены с помощью широкого спектра методов и методик исследований. Эти данные могут быть собраны, зарегистрированы и отображены в виде точек, линейных диаграмм, 2D-планов или разрезов, 3D-вокселей или многогранников. Это многообразие должно обеспечиваться путем формирования достаточно гибкой общей структуры данных.

Для включения зарегистрированных в журналах данных или других записей исследований (бурения, зондирования и т.д.) в цифровую трехмерную модель требуется реляционная база данных. Взаимосвязи между записями/данными в такой базе обеспечиваются с помощью двух связанных таблиц, таких как:

- таблица источников данных, в которой указаны координаты устьев, ориентация/азимуты, углы наклона и др., а также другая информация по пространственному расположению (файл «Пространственные параметры» – Collar File);
- таблица атрибутивных данных, зарегистрированных для разных глубин или интервалов глубин для каждого источника данных (файл «Данные бурения» – Downhole File).

Эти две таблицы связаны между собой ключом, который обычно представляет собой один атрибут или группу атрибутов. Этот ключ – критически важный элемент реляционной базы данных, который используется для установления и идентификации взаимосвязей между таблицами, а также для однозначной идентификации любой записи или строки данных внутри таблицы.

В отношении управления данными рекомендуется, если это возможно, использовать универсальные файлы проекта, чтобы свести к минимуму зависимость от специфичных для той или иной программы временных/переходных файлов проекта, которые имеют ограниченную функциональность при взаимодействии между программами или версиями. Фиксированные или фактические данные обычно кодируются стандартизированным образом, например по национальному описательному стандарту, такому как формат Ассоциации специалистов по геотехнике и геоэкологии (AGS – Association of Geotechnical and Geoenvironmental Specialists) в Великобритании, или по международному описательному стандарту, такому как формат обмена данными для специалистов по геотехнике и геоэкологии (DIGGS – Data Interchange for Geotechnical and Geoenvironmental Specialists) в США. К текстовым форматам можно получить доступ без какого-либо специального программного обеспечения для моделирования, несмотря на то что размеры файлов могут быть большими.

Существуют стандарты передачи данных, которые позволяют передавать данные геотехнических наблюдений на протяжении всего жизненного цикла проекта.

Как и с любыми другими данными, требуется тщательная надежная проверка, чтобы гарантировать, что географическая информация и наблюдаемые атрибуты являются обоснованными, приемлемыми, а их погрешности не превышают допустимые величины (выбранные и задокументированные разработчиком модели). На основе такой оценки могут быть приняты решения о том, следует ли включать в модель конкретные наборы данных, а также относительно уровня достоверности для каждого отдельного набора данных. Эта оценка и принятые решения должны быть задокументированы разработчиком модели в отчете по цифровой 3D-модели.

2.3.5.3. Документация по цифровой 3D-модели

Есть риски, связанные с предоставлением «статичных» выходных данных разным группам, занятым в проекте, при постоянном обновлении ИГМ в ходе развития этого проекта. Требуется процесс, гарантирующий, что проектные группы используют информацию из самой актуальной ИГМ. Возможно, потребуются классифицировать информацию как фиксированную (например, если речь идет о данных/информации, например о протоколах лабораторных испытаний, которые, как ожидается, не будут изменены) и/или как интерпретированную (например, если речь идет об инженерно-геологических границах/поверхностях), которая может изменяться по мере получения новых данных/информации.

На более поздних этапах развития проектов, особенно во время строительства, необходимо пересмотреть и обновить цифровую 3D-модель, используя новую информацию/данные, а также по-новому интерпретировать соответствующую инженерно-геологическую роль. Это может быть обязанностью инженера со стороны владельца или со стороны подрядчика, но ответственность должна быть четко распределена.

Большое значение имеет прозрачное управление версиями цифровой модели и ее компонентов, используемых в рамках системы поддержки принятия решений. Исход возможного судебного разбирательства может зависеть от демонстрации того, что модель предоставляла наилучшую информацию в нужный момент, а не от того, что было обнаружено позже. История разработки цифровой модели должна быть задокументирована вручную (например, с помощью электронной таблицы) или автоматически (с помощью программного обеспечения или интернет-инструмента).

2.3.5.3.1. Важность эффективного рабочего процесса управления данными

Надлежащее управление данными – необходимое условие для эффективности процесса разработки цифровой 3D-модели. Это дает значительные экономические преимущества в отношении общей стоимости разработки и использования модели. Предлагается следующий рабочий процесс:

- **план:** описание данных, которые будут собираться, способов их сбора, управления ими и обеспечения доступа к ним на протяжении всего срока действия этого плана (в этом, вероятно, будут участвовать заказчик или другие заинтересованные стороны; кроме того, следует призывать владельцев сохранять их собственные данные);
- **сбор:** сбор и обобщение полевых и лабораторных данных в виде либо стандартизированного файла данных, либо отчетов по данным в печатном виде, либо шаблонов для сбора данных в виде электронных таблиц / баз данных (проформ);
- **гарантия:** качество зарегистрированных данных по возможности обеспечивается с помощью проверок в рамках процедур обеспечения качества (в соответствии со стандартами ISO 9001, UKAS, AGS) с использованием соответствующих внутренних процедур верификации и валидации;
- **описание:** данные тщательно упорядочиваются (ненужное удаляется) и досконально описываются в понятной для конечного пользователя форме (если какие-то данные подлежат исключению, то основания для этого должны четко документироваться);
- **сохранение:** данные отправляются либо в соответствующий долгосрочный архив, либо в облачное хранилище данных (в котором информация организована и структурирована с использованием индексов для обеспечения быстрого и эффективного поиска), либо в папки и файлы проекта;

- *поиск*: нахождение и сбор потенциально полезных данных, а также соответствующей информации о них (метаданных);
- *интеграция*: данные из разных источников объединяются в единый однородный набор данных, который можно легко анализировать (здесь критически важно, чтобы любые ограничения в отношении данных или решения и действия по масштабированию были четко определены и задокументированы);
- *анализ*: данные используются для создания визуализаций (разрезов или цифровых 3D-моделей) и оцениваются с помощью электронных таблиц или более сложных методов анализа данных.

2.3.5.4. Проверка цифровых 3D-моделей

Контролирующий и проверяющий сотрудники должны иметь соответствующий опыт в отношении инженерно-геологических условий площадки, требований проекта и программного комплекса, применяемого для создания цифровых 3D-моделей.

Перед анализом созданной цифровой 3D-модели надо сначала выполнить проверку системы моделирования, для чего инженер-геолог должен быть знаком с использованным программным пакетом и уметь проверять следующее:

- актуальность входных данных и правильность импортирования нужных столбцов из базы данных;
- пригодность разрешения топографических данных и 3D-модели;
- выбор поверхностей для каждого инженерно-геологического элемента;
- связь между каждой поверхностью и остальными инженерно-геологическими элементами;
- характер поверхностей в 3D-виде и то, насколько они соответствуют базовой концептуальной модели, скважинным и входным данным;
- любые разрезы или другие разработанные материалы.

Проверка, анализ и верификация цифровых 3D-моделей – критически важный этап процесса моделирования, который обеспечивает гарантию качества. Поскольку цифровая 3D-модель является одним из компонентов ИГМ, необходимо следовать процессам и принципам, изложенным в разделе 1.1, а также этапам разработки, описанным в разделе 1.2. Анализ и верификация цифровых 3D-моделей могут быть более сложными и трудоемкими, чем проверка обычных карт и разрезов, поскольку должны быть проанализированы и верифицированы все зоны поверхностей и объемов, чтобы удостовериться в том, что они соответствуют требованиям к ИГМ.

Если 3D-модель используется в качестве основы для интерпретации данных, а не в качестве конечного результата для создания и представления 2D-карт и 2D-разрезов, то эти разрезы должны быть проанализированы в соответствии со стандартной практикой (путем оценки скважинных данных, геологических умозаключений и т.д.).

2.3.5.5. Выходные данные цифровых 3D-моделей

Важно, чтобы неопределенности в цифровой 3D-модели были задокументированы и четко доведены до сведения пользователей. К извлекаемым поверхностям или другим элементам модели должны быть привязаны метаданные, указывающие на неопределенности.

Несмотря на то что визуализация может быть создана в 3D-виде, не для всех проектов требуются трехмерные результаты моделирования. Для некоторых проектов могут быть

достаточными или даже предпочтительными двумерные материалы, получаемые из цифровой 3D-модели. Многие программные пакеты для моделирования в настоящее время настроены таким образом, что 2D-результаты могут быть экспортированы из программного комплекса в различных форматах, включая форматы для просмотра (например, PDF) и форматы файлов цифровых чертежей (например, .dwg), которые могут быть напрямую импортированы в другие программы для анализа.

Цифровые 3D-модели также можно импортировать в другие программы для трехмерного моделирования и проектирования, чтобы напрямую обеспечивать информацией проектирование элементов, зависящих от грунтовых условий. Для таких случаев необходимо позаботиться о том, чтобы было четко сообщено о неопределенностях всем текущим и будущим пользователям цифровой 3D-модели.

Может быть полезным включение в выходные 3D-результаты 2D-деталей. Примером этого является интеграция в цифровую 3D-модель типичных или конкретных детальных 2D-разрезов, которые могут быть снабжены пояснениями. Это обеспечивает такой уровень детализации выходных данных, который нелегко передать в 3D-формате и который помогает в передаче деталей ИГМ и в устранении неопределенностей.

К любым выходным данным должен прилагаться отчет по цифровой 3D-модели.

Другие пути визуализации включают в себя использование формата 3D-PDF, различных специальных инструментов для визуализации цифровых моделей, анимации и видеороликов, виртуальной или дополненной реальности, 3D-печати и т.д.

2.3.5.5.1. ИГМ и информационное моделирование объектов строительства

Информационное моделирование объектов строительства (BIM – Building Information Modeling) – это процесс, включающий в себя создание и управление цифровыми представлениями физических и функциональных характеристик зданий/сооружений или их групп. Это делается для того, чтобы обеспечить своевременное получение нужной информации в подходящем формате для возможности принятия наилучших решений на всех этапах проектирования, строительства и эксплуатации объектов (Kessler et al., 2015). Может быть очень полезным (например, для оценки проекта) сочетание 3D-визуализации грунтового основания с техногенными компонентами проекта (иногда называемое сводной/федеративной моделью).

Однако важно понимать ключевые различия между моделями наземных и надземных конструкций (BIM) и ИГМ с точки зрения неопределенностей и способов разработки моделей. Могут возникнуть проблемы с цифровыми выходными данными ИГМ, которые импортируются в системы BIM и затем считаются точными и обоснованными, хотя для них целесообразна и/или необходима дальнейшая доработка.

Кроме того, важно осознавать или напоминать пользователям и разработчикам моделей об уровнях неопределенности и о том, как соотносятся их шкалы между ИГМ и BIM. В моделях BIM работы обычно рассматриваются с точностью до миллиметра, тогда как ИГМ может иметь точность в десятки метров, соответствующую интерпретированным грунтовым условиям. Это повлияет на применимость любой такой модели в иерархии BIM с точки зрения уровня проработки/детализации (BIM Forum, 2019).

Отсюда можно вернуться назад к разделу 1.3 «КОМПОНОВКА И ПЕРЕДАЧА ИГМ»

2.4. УПРАВЛЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯМИ ИГМ

2.4.1. Введение

Неопределенности в ИГМ вызваны недостаточно хорошо известными или полностью неизвестными аспектами системы знаний. Эти неопределенности могут отрицательно сказаться на надежности ИГМ (степени, в которой прогнозируемые инженерно-геологические условия дают точное и обоснованное приближение к фактическим условиям или поведению, поскольку это влияет на проект). Снижение надежности приведет к увеличению риска, который представляет собой вероятность неблагоприятного исхода и часто выражается в терминах комбинации последствий ряда событий или реализации тех или иных сценариев и соответствующих вероятностей их возникновения.

Повышение надежности и уменьшение общего риска проекта происходит за счет накопления информации как на основе концепций, так и на основе наблюдений в системе знаний ИГМ – как правило, на различных этапах изысканий, которые проводятся по мере развития проекта (рис. 2-15).

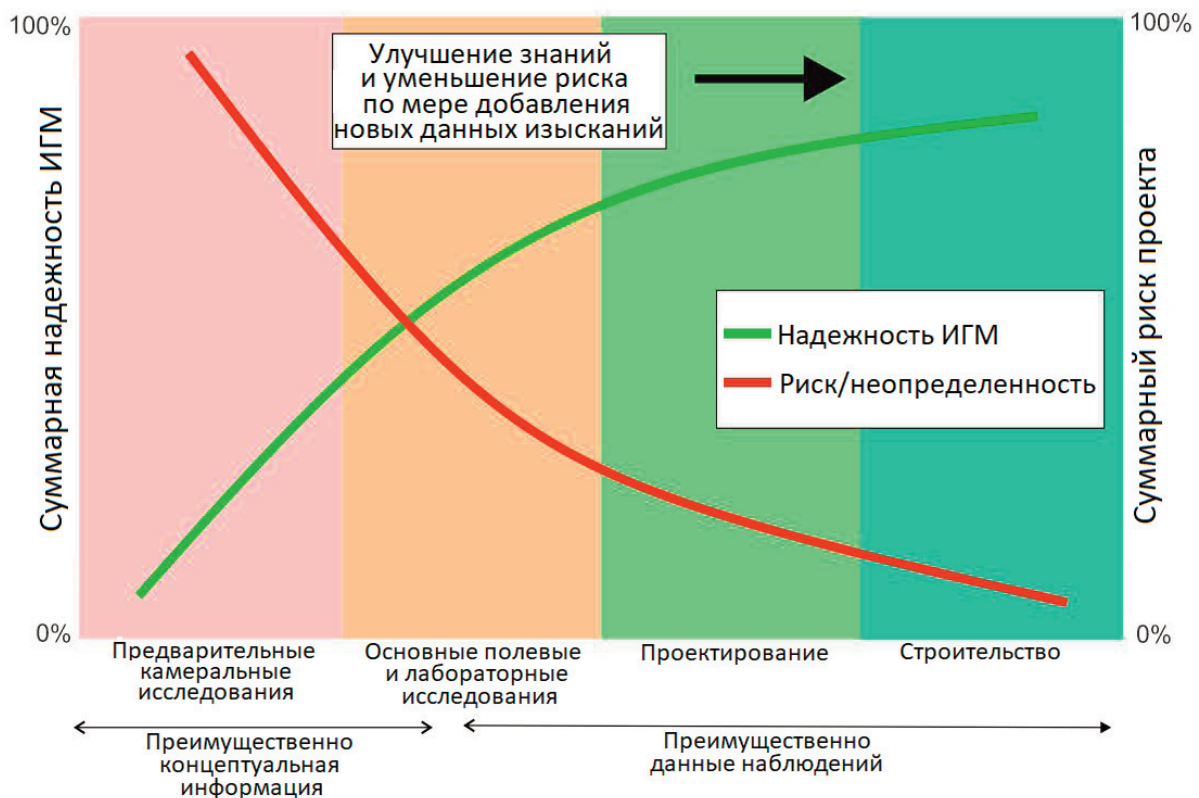


Рис. 2-15. Идеализированный ход улучшения надежности ИГМ по мере развития проекта

Однако классическое допущение того, что постепенное уменьшение риска и сопряженное повышение надежности ИГМ будут происходить по мере продвижения последовательных этапов изысканий, потом проектирования, а затем строительства, может быть обманчивым. Для значимого снижения риска и улучшения знаний и их понимания требуется обратная связь на каждом этапе проекта (Carter, 1992; Carter, Marinis, 2020). Важно, чтобы ИГМ проверялась, пересматривалась и при необходимости улучшалась или изменялась в ходе развития проекта.

Повышение надежности модели достигается за счет улучшения понимания системы знаний, когда концептуальные представления и данные наблюдений согласуются друг с другом, что выявляется путем итеративного процесса анализа, сравнения, модификации и верификации.

Точная проверка ИГМ на соответствие сложным реальным геологическим условиям проблематична. Однако наличие обратной связи в процессе разработки инженерно-геологической модели (рис. 2-16) позволяет ограничить ее верификацию сопоставлением с данными наблюдений, получаемыми в ходе развития проекта. Если эти сравнения показывают повышение надежности модели по мере развития проекта, то строительство часто может быть проведено более эффективно, даже несмотря на то что ИГМ не всегда является полностью точной.

Уровень риска для проекта, считающийся приемлемым, отражает склонность владельца/заказчика к риску и значительно варьирует как в сфере геотехнического проектирования, так и в мировой практике в целом. Этот целевой профиль риска надо учитывать на ранних этапах развития проекта, поскольку в конечном итоге он определяет уровень неопределенности, который является приемлемым в рамках системы знаний ИГМ, и, следовательно, характер и объем изысканий, необходимых для снижения неопределенностей до приемлемых уровней. Целевой профиль риска может быть выражен различными способами – начиная с простого указания приемлемого уровня риска в качественном виде и заканчивая использованием сложной количественной оценки риска и точно определенных критериев его приемлемости.

На протяжении всего жизненного цикла проекта неопределенности в рамках системы знаний ИГМ также должны быть доведены до сведения различных заинтересованных сторон проекта (некоторые из которых, возможно, не будут обладать техническими знаниями) с использованием методов, соответствующих их возможностям и требованиям.

Предпочтительны простые прозрачные классификации уровней риска, например такая:

- **чрезвычайный риск** (представляет значительную угрозу проекту; требуются немедленные действия);
- **высокий риск** (может представлять угрозу для проекта; восстановление возможно; необходимо внимание высшего руководства);
- **средний риск** (может представлять угрозу для проекта; возможно почти немедленное восстановление; необходимо четко определить ответственность руководства);
- **низкий риск** (представляет минимальную угрозу для проекта; управление им осуществляется с помощью рутинных стандартных процедур).

2.4.2. Источники неопределенностей

2.4.2.1. Неопределенности в концептуальной модели

Решения, принятые в процессе концептуализации, могут вносить в модель систематические ошибки оценок и неопределенностей. Бонд и др. (Bond et al., 2008) отметили несколько типов ошибок, наиболее важными из которых являются:

- эвристика доступности, или предвзятость доступности – интерпретация, которая легче всего приходит на ум и примеры которой являются привычными;
- эффект привязки, или предвзятость привязки – принятие «экспертного» или доминирующего в публикациях мнения (то есть первой полученной информации в качестве точки отсчета для оценок);
- предвзятость подтверждения – поиск только тех мнений или фактов, которые

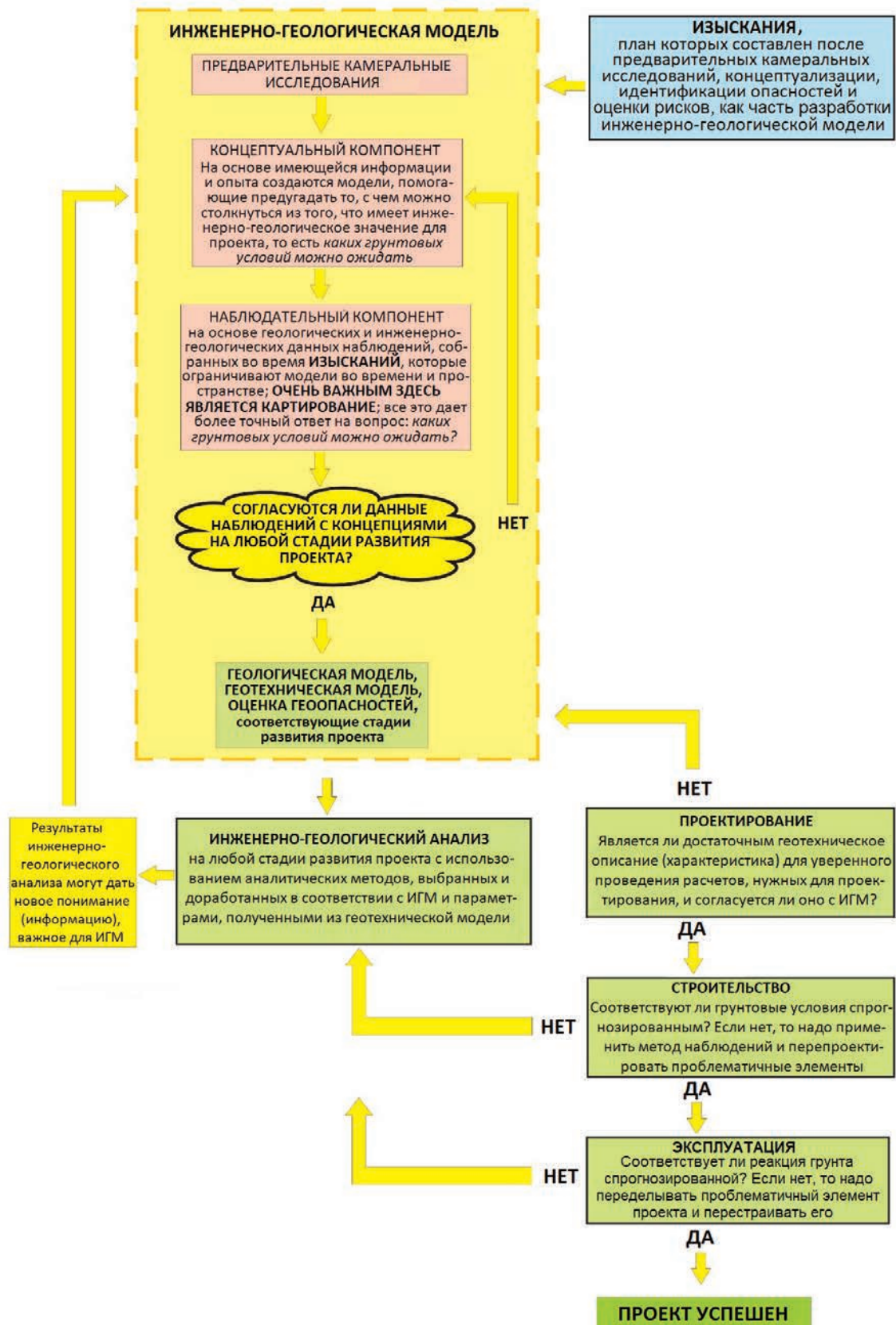


Рис. 2-16. Циклы обратной связи для последовательного уточнения ИГМ в течение жизненного цикла проекта

подтверждают чью-то собственную гипотезу, или аналогичная интерпретация данных в соответствии с этой гипотезой;

- предвзятость оптимизма, или склонность к оптимизму – такая интерпретация, которая даст более позитивный результат для исследования (например, интерпретация большей непрерывности структур, контролирующей минерализацию, или избегание размещения разломов), или предпочтительное игнорирование противоречивых данных, которые могут уменьшить положительные результаты проекта.

Важны также следующие факторы:

- пространственная значимость данных для проекта – местоположение и масштаб;
- качество доступных источников данных;
- репрезентативность и адекватность объема (количества) доступных данных;
- геотехническая сложность.

Однако общая надежность концептуальной модели в первую очередь зависит от уровня опыта и знаний тех, кто участвует в ее разработке.

2.4.2.2. Неопределенности в наблюдательной модели

При условии что в рамках надежной концептуальной модели учитывается достаточный объем данных наблюдений, у неопределенностей в наблюдательной модели будут следующие причины:

- внутренняя изменчивость (естественная пространственная изменчивость геологической среды, которая не может быть уменьшена);
- ограниченность данных (невозможность измерения показателей геологических и геотехнических свойств в каждой точке грунтового массива; но можно уменьшить неопределенности путем увеличения количества измерений и их оптимального распределения);
- неопределенности при испытаниях (неопределенности, связанные с точностью измерений, обеспечиваемой испытательными устройствами; их невозможно устранить без улучшения качества испытательного оборудования).

2.4.3. Комплексная оценка надежности ИГМ путем ее проверки и анализа

ИГМ считается надежной, если существует достаточная совместимость, или согласованность, между развивающейся концептуальной моделью и собранными данными наблюдений. Именно концептуальная модель используется для оценки этой согласованности, поскольку она воплощает в себе принципиально правильное инженерно-геологическое мышление, которое необходимо развить для конкретной площадки. Это сопоставление также позволяет оценить адекватность концептуальной модели: если между ней и данными наблюдений слишком много расхождений и они увеличиваются по мере получения большего количества результатов наблюдений, то ее надо пересмотреть и исправить. При этом предыдущие версии концептуальной модели не должны быть названы неправильными или неточными, а должны быть признаны частью итеративного процесса и задокументированы как части разработки ИГМ.

Несмотря на то что экспертный анализ включает оценку концептуальных компонентов ИГМ, такие проверки обычно проводятся в течение ограниченного времени и часто не позволяют вникнуть в

детали в достаточной степени, чтобы выявить существенные спорные вопросы разработки, которые могут повлиять на конечную надежность модели. Оптимальный подход для минимизации влияния этого неотъемлемого ограничения заключается в проведении первого экспертного анализа как можно раньше, в начале развития проекта, и в регулярном выполнении последующих проверок до самого завершения проекта. Это будет невозможно, если первая экспертная проверка будет назначена на полпути к завершению проекта, например в связи с каким-либо крупным сбоем в нем.

2.4.4. Другие методы оценки неопределенностей и надежности ИГМ

2.4.4.1. Оценка надежности концептуального компонента

На согласованных стадиях на всем протяжении разработки и уточнения инженерно-геологической модели надо выполнять ее собственные проверки (самоконтроль) так, чтобы можно было сравнить надежность концептуальной модели с соответствующими концептуальными аналогами с такими же геологическими характеристиками, как и для моделируемой площадки. Таким образом, самоконтроль должен быть направлен на сравнение намеченной концепции с реальными примерами, известными в мире.

2.4.4.2. Оценка надежности наблюдательного компонента – качественные подходы

Есть множество способов информирования пользователей о надежности наблюдательной модели, в том числе с помощью графиков и тематических карт. На рисунке 2-17 показан пример

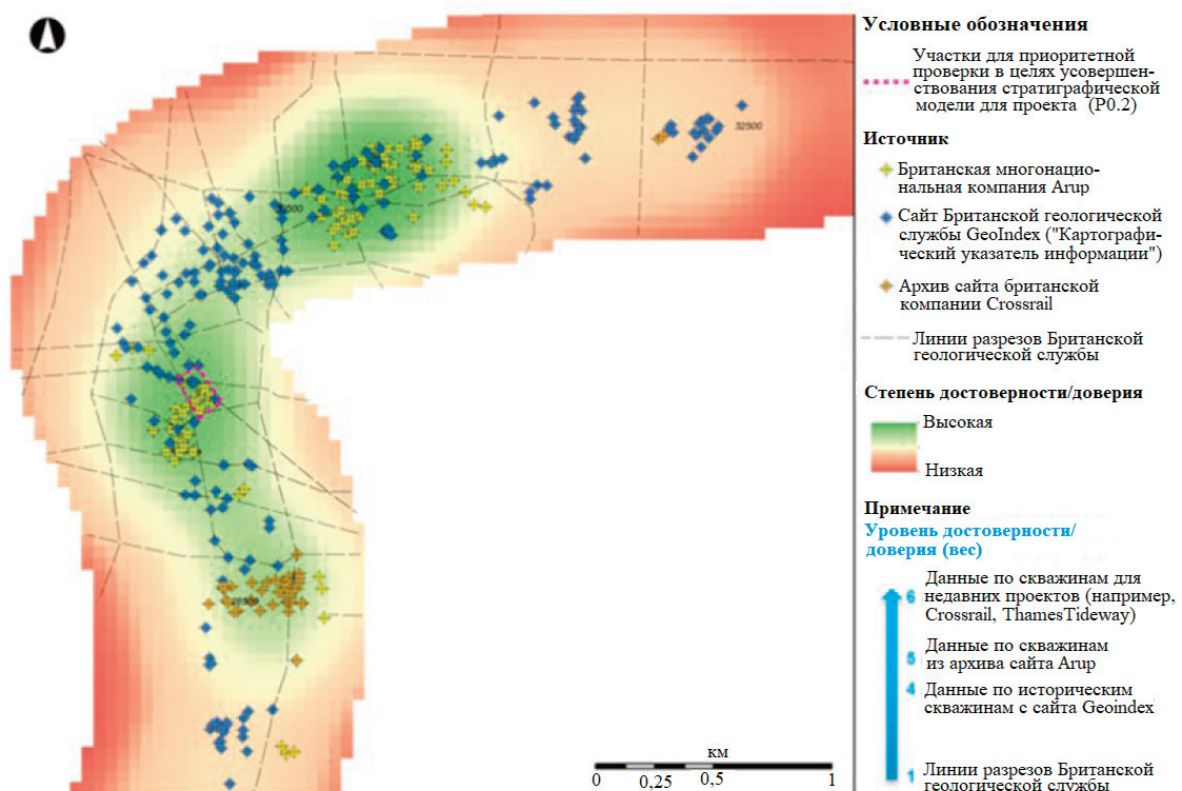


Рис. 2-17. Тепловая карта степени достоверности для уровней стратиграфической модели (по Ting et al., 2020)

Таблица 2-3. Неопределенность, связанная с имеющейся информацией	
Тип/категория данных	Требования (адаптированные по Haile, 2004), при условии, что ИГМ разработана в соответствии с руководством
Предполагаемые	• Нет необходимых или доступных геотехнических данных для конкретного участка; • ИГМ имеет преимущественно концептуальный характер; • ИГМ имеет низкий уровень надежности
Условно пригодные	• Данные, относящиеся к конкретному проекту, в целом отражают основные инженерно-геологические элементы и предполагаемые геотехнические домены, хотя локальные изменчивость или непрерывность свойств не могут быть должным образом учтены; • данные наблюдений в целом соответствуют концептуальной модели; выявлены не соответствующие ей области; • ИГМ обладает средним уровнем надежности
Обоснованные	• Данные, относящиеся к конкретному проекту, имеют достаточную плотность пространственного распределения для идентификации инженерно-геологических элементов и демонстрации непрерывности и изменчивости геотехнических свойств в пределах каждого элемента; • высокая степень согласованности между концептуальной и наблюдательной моделями; • ИГМ обладает высоким уровнем надежности
Верифицированные	• Получены данные по конкретной площадке; все инженерно-геологические границы (элементы) закартированы по результатам полевых исследований на площадке по мере их вскрытия в ходе строительства; • высокая степень согласованности между концептуальной и наблюдательной моделями; • ИГМ включает в себя отображение воздействий (например, фундамента/тоннеля) и результаты непосредственных полевых наблюдений за условиями; • ИГМ обладает наивысшим уровнем надежности

графического представления неопределенности – диаграмма надежности в виде тепловой карты.

Неопределенности в геометрическом представлении моделей также могут быть задокументированы и визуализированы с помощью таких методов, как:

- запрос расстояний (цветовые оттенки поверхности и подповерхностного пространства на основании расстояний от точек исследований);
- падение поверхности (определение интересующих зон, таких как возможные разломы, которые наблюдаются в виде крутопадающих поверхностей между точками исследований);
- проведение границ модели таким образом, чтобы не превышалось заданное максимальное расстояние от точек исследований.

2.4.4.2.1. Относительная надежность геотехнических наблюдений

К оценке относительной надежности данных ИГМ может быть применен качественный подход – классификация наборов данных по степени надежности (в порядке от наименьшей к наибольшей) по категориям: «предполагаемые», «условно пригодные», «обоснованные» и, наконец, «верифицированные» (таблица 2-3).

2.4.4.3. Оценка надежности наблюдательного компонента – полуколичественные подходы

2.4.4.3.1. Индекс R для тоннелестроения

Индекс R относится к рейтинговому/ранговому методу оценки надежности геологических и

геотехнических моделей, разработанному для строительства тоннелей (Perello et al., 2005; Dematteis, Soldo, 2015; Venturini et al., 2019), но затем получившему распространение в горнодобывающей промышленности, в частности для валидации моделей карьеров (Carter, Barnett, 2021). Этот метод позволяет оценить качество данных геотехнических исследований и геологическую сложность изучаемой территории для оценки надежности модели.

Дематтейс и Сольдо (Dematteis, Soldo, 2015) представили детальные объяснения по применению этого метода для проектов по тоннелестроению на основе системы классификации, разработанной с учетом таких характеристик/параметров, как:

- качество геологических и геотехнических изысканий – рассматриваемый метод дает для каждого из параметров рейтинговые таблицы по следующим темам:
 - инженерно-геологическое картирование, включая аэрофотосъемку и интерпретацию спутниковых изображений;
 - геофизические изыскания (косвенные исследования);
 - бурение скважин и каротаж, полевые и лабораторные испытания (прямые исследования).
- сложность площадки, которая может быть описана с помощью трех следующих геологических характеристик, называемых системными параметрами (рассматриваемый метод дает таблицу с рейтинговыми оценками, которые будут использоваться для ожидаемых геологических условий):
 - сложность литолого-стратиграфической обстановки (ЛС, *англ.* LC);
 - сложность структур, связанных с пластическими деформациями (ПС, *англ.* DC);
 - сложность структур, связанных с хрупкими деформациями (ХС, *англ.* BC);

Поскольку многие из этих характеристик (параметров качества и системных параметров) могут быть связаны друг с другом, влияние одного параметра на все остальные и наоборот учитывается с помощью бинарных и полностью связанных матриц взаимодействий.

Расчет индекса R производится по продольному геологическому и геотехническому профилю тоннеля. Трасса тоннеля разделяется на однородные участки, которым присваиваются ранги/уровни описанных выше параметров, что позволяет рассчитать индексы R для каждого участка. Величины индекса R варьируют от 0 до 10. Их значимость с точки зрения надежности модели была определена на основе анализа нескольких практических примеров и представлена четырьмя классами (A, B, C, D), как показано в таблице 2-4.

В рассматриваемом методе используется специальный модуль, направленный на составление и выполнение плана геотехнических изысканий для повышения надежности модели (Perello et al., 2005; Dematteis, Soldo, 2015). Этот метод позволяет оценить качество каждого из данных модели и влияние, которое различные типы геотехнических исследований могут оказать на повышение рейтинга, и, следовательно, помогает принять решение о наиболее подходящем типе геотехнических исследований для увеличения надежности модели.

2.4.4.3.2. Оценка неопределенностей

После выполнения инженерных изысканий можно систематически оценивать уровни неопределенности и надежности различных частей системы знаний ИГМ для определения последствий реализации проекта, например с использованием метода, разработанного Полом (Paul, 2018).

Таблица 2-4. Надежность геологических и геотехнических моделей в проектах тоннелей с использованием индекса *R* (по Dematteis, Soldo, 2015, с изменениями)

Индекс <i>R</i>		Надежность	Описание
Класс	Значения		
A	10–7,6	От хорошей до очень хорошей	Границы и разломы, указанные на разрезе, будут встречаться в пределах $\pm(25–50)$ м; допустимая погрешность определения мощности литологических слоев может составлять 10–20%
B	7,5–5,1	От средней до хорошей	Границы и разломы, указанные на разрезе, будут встречаться в пределах $\pm(50–100)$ м; допустимая погрешность определения мощности литологических слоев может составлять 30–50%. В дополнение к указанным могут присутствовать и другие незначительные разломы
C	5–2,6	От плохой до средней	Границы и разломы, указанные на разрезе, будут встречаться в пределах $\pm(100–200)$ м; допустимая погрешность определения толщины литологических слоев может составлять 50–100%. В дополнение к указанным могут присутствовать и другие крупные разломы
D	2,5–1	Модель не во всем надежна или ненадежна	Границы и разломы, указанные на разрезе, могут отсутствовать, но могут присутствовать другие элементы. Мощность литологических слоев не определена. Могут присутствовать геологические элементы, отличные от прогнозируемых

2.4.4.3.3. Использование отчета по метаданным

Неопределенности, связанные с электронными файлами, которые могут включать в себя как данные, так и их интерпретации, могут быть задокументированы в виде независимого отчета по метаданным, прилагаемого к файлам, которыми обмениваются специалисты внутри организаций или которые передаются между различными дисциплинами и программными приложениями.

2.4.4.4. Оценка надежности наблюдательного компонента – количественные подходы

Количественно оценить этот тип неопределенностей и управлять им позволяют также следующие методы: метод случайных полей, кригинг и стохастическое моделирование. Они будут кратко описаны далее.

2.4.4.4.1. Метод случайных полей

Этот метод позволяет пользователям интерпретировать неопределенность пространственной изменчивости через детерминированную функцию тренда и случайные флуктуации. Реализуя свойства случайных флуктуаций в рамках моделирования методом Монте-Карло, пользователи могут рассчитать пространственное стандартное отклонение, связанное с оценочными значениями параметров во всем интересующем домене (Vanmarcke, 1984).

2.4.4.4.2. Методы кригинга

Методы кригинга – это набор одномерных и многомерных методов, относящихся к

геостатистике, которые позволяют отображать пространственное распределение количественных данных с географической привязкой, таких как показатели механических и гидравлических свойств дисперсных и скальных грунтов и содержащихся в них жидкостей. Эти методы основаны на теории регионализированных переменных, которая рассматривает измеряемые дискретным образом количественные атрибуты определенного домена (например, инженерно-геологического элемента) как случайные и пространственно зависимые переменные. То есть значения, относящиеся к близко выполненным измерениям, скорее всего будут более схожими по сравнению с данными измерений, выполненных пространственно дальше друг от друга. Эти геостатистические методы обеспечивают количественное определение неопределенностей, связанных с оценками, выраженными через дисперсию кригинга, которая, в свою очередь, может дать значение стандартного отклонения (в пределах одного и того же инженерно-геологического элемента) или искомые пределы доверительного интервала (Vessia et al., 2020). Чтобы кригинг приводил к значимым результатам, он должен быть выполнен для инженерно-геологических элементов, выделенных в процессе разработки ИГМ.

2.4.4.4.3. Методы стохастического моделирования

Методы стохастического моделирования позволяют количественно оценить неопределенность, давая ряд виртуальных реализаций с использованием функций пространственной изменчивости, определенных с помощью экспериментальных измерений (то есть на основе вариограмм или линейных моделей корегионализации). Полученные в результате многочисленные равновероятные конфигурации пространственного распределения, зависящие от исследуемого геотехнического параметра, приводят к статистическому распределению значений в каждой точке рассматриваемого домена, что представляет собой оценку и количественное выражение локальной неопределенности.

2.4.4.4.4. Учет неопределенности данных в расчетных параметрах проекта

Пояснения этих аспектов проектирования выходят за рамки настоящего руководства.

[Отсюда можно вернуться назад к разделу 1.4. «УПРАВЛЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯМИ ИГМ»](#)

2.5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ИГМ

2.5.1. Общие цели ИГМ в области качества

ИГМ должна быть направлена на достижение ряда целей. Необходимо, чтобы она была:

- соответствующей тендерной документации и техническому заданию проекта;
- робастной (надежной в применении, устойчивой к влиянию небольших задаваемых изменений) – созданной с помощью логического осмысления всей доступной информации с привлечением значительного опыта и со следованием геологической логике;
- прозрачной – легко доступной и понятной даже для людей, не имеющих технического образования или опыта;
- обоснованной – имеющей достаточно высокое качество для того, чтобы выдерживать разумную критику;
- непротиворечивой – все в модели должно работать гармонично и не иметь серьезных недостатков;
- достаточной – в модели должны быть задокументированы и объяснены все важные инженерно-геологические условия площадки;
- нужной – части модели, которые не являются необходимыми, должны быть удалены.

2.5.2. Проверка качества процесса разработки ИГМ

2.5.2.1. Стандартизация входных данных модели

Стандартизация входных данных уменьшит трудности при разработке моделей на разных этапах одного и того же проекта (которые могут выполняться разными организациями или частными лицами) и/или поможет стандартизировать форматы ввода данных для различных портфелей активов. Это позволит пользователям/заказчикам распространять эти модели внутри своего бизнеса для получения максимальной отдачи от них и поможет сделать их более понятными тем, кто не имеет знаний в сферах геологии, геотехники и гражданского строительства.

Таблица 2-5 не претендует на полноту в отношении категоризации пространственных слоев, но дает представление о том уровне детальности информации, которую пользователи или заказчики хотели бы видеть как «типичную».

Таблица 2-5. Стандартизация входных данных		
Тип данных	Подтип данных	Требуемая информация
Топографические данные		Дата, метод получения данных, топографическое описание (например, координаты и т.д.), устаревшие или актуальные данные, заявленная точность, масштаб
Данные по скважинам и выемкам грунта	Пространственные параметры разведочной выработки	Уникальный идентификатор (ID) выработки, координаты X, Y, Z устья, проекция и условный нуль отсчета высот, глубина, наклон, азимут, стандарт записи данных, тип разведочной скважины/шурфа/канавы, метод
	Данные бурения (базовый набор данных для всей производной информации)	Уникальный идентификатор (ID) выработки, интервалы глубины (от... до), тип скального/дисперсного грунта, описание скального/дисперсного грунта. Обычно эти сведения содержатся в базе данных в общепринятом формате, например таком как AGS (предложенном британской Ассоциацией специалистов в области геотехники и геоэкологии), а принимающей стороне предоставляется вся база данных

Таблица 2-5. Стандартизация входных данных (продолжение)

Тип данных	Подтип данных	Требуемая информация
Структурные данные (результаты геологических измерений)		Дата получения данных, тип дефекта, результаты измерения магнитного или истинного (географического) азимута
Пьезометрические данные		Уникальный идентификатор (ID) пьезометрической скважины, дата ее бурения, устье скважины, приведенный уровень (RL), глубина скважины, тип пьезометра, дата измерения, уровень подземных вод, результат полевого испытания на проницаемость
Геологические разрезы		Название и краткое описание разреза, дата, кем построен и кем проверен/одобрен, допустимое отклонение расположения разреза, ориентация, масштаб, методы проецирования скважин/шурфов
Основные структурно-геологические особенности (разломы, дайки, зоны сдвига, оси антиклиналей и синклиналей)		Уникальный идентификатор (ID) разлома (если необходимо), степень достоверности (концептуальная, предполагаемая/низкая, средняя или высокая), длина экстраполяции и ее обоснование, оцененная ширина разлома/зоны (если известна), описание характеристик разлома, стандарт на описание (например, AS 1726:2017)
Карты с географической привязкой	Результаты аэрофотосъемки / дистанционного зондирования Земли	Дата получения, тип данных (результат лидарной съемки, аэрофотоснимок, спутниковое изображение и т.д.), метод получения, диапазоны волн, методы обработки, устаревшие или актуальные данные, оцененная точность/погрешность геопривязки, масштаб
	Изображения (информация, которая должна быть включена в само изображение или в обозначения в зависимости от ситуации)	Номер изображения, дата его получения, масштаб, условные обозначения к нему (при наличии), система координат исходного изображения, оцененная точность/погрешность геопривязки
Геофизические данные	Профили наблюдений (например, сейсмической съемки)	Дата, метод получения данных, наземная или надводная съемка, условные обозначения, оцененная точность/погрешность геопривязки
	Материалы аэро-съемки (например, гравиметрической или радиометрической)	Дата получения, метод получения данных, условные обозначения, оцененная точность/погрешность геопривязки, масштаб
	Материалы скважинных геофизических исследований (например, кабельной геофизической съемки для оценки плотности пород или сканирования стенок скважин с помощью акустического телевидения, то есть скважинного акустического телевизора)	Тип исследований, дата получения данных, масштаб измерений (в зависимости от ситуации)

Следует отметить, что более старая информация, не соответствующая «стандартному» формату, может быть расценена как неточная или неполная и исключена из базы данных. Однако, поскольку эта информация все-таки может дать бесценные идеи и помочь лучше понять грунтовые условия, ее крайне важно включить в модель. Важно сделать так, чтобы протоколы стандартизации входных данных не использовались для фильтрации и исключения нестандартных, но, возможно, критически важных данных.

В некоторых случаях может потребоваться, чтобы входные данные для модели соответствовали требованиям конкретного плана управления цифровым проектом.

Отсюда можно вернуться назад к разделу 1.5. «ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ИГМ»

2.6. ИГМ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

2.6.1. Общая информация

Система знаний ИГМ поддерживает проектную документацию, закупки по проекту, инженерные изыскания, проектирование, строительство и управление рисками. Поэтому она важна для владельца проекта, главного инженера проекта, подрядчика, регулирующего органа и других заинтересованных сторон.

2.6.2. Общее представление о развитии ИГМ на разных этапах проекта

ИГМ играет ключевую роль в ходе этапов «моделирование – анализ – проектирование – строительство – эксплуатация». Хотя не каждый проект будет развиваться одинаково и для описания его этапов в разных направлениях геотехнического строительства используются разные термины, далее приводится краткое описание того, как может эволюционировать ИГМ на протяжении жизненного цикла объекта.

Этап разработки концепции / предварительного технико-экономического обоснования

- Модель в значительной степени основывается на уже имеющейся информации и результатах предварительных камеральных исследований.
- Модель имеет низкую надежность, особенно в детальном масштабе (на уровне предполагаемой площадки строительства). Более высокая достоверность – в региональном масштабе.
- Модель в основном является концептуальной.
- Создается первоначальная геологическая модель и, при необходимости, первоначальная оценка геопасностей.
- Модель информирует о геотехнических проблемах и опасностях высокого уровня, а также о последующих этапах изысканий.
- На этом этапе может начинаться 3D-визуализация.
- Визуализация может быть относительно простой, например с упором на помощь в интерпретации геоморфологической, стратиграфической либо литологической информации, или может быть более сложной, например если проводилось рекогносцировочное картирование.

Этап разработки технико-экономического обоснования

- Доступны данные инженерных изысканий на площадке. Концептуализация анализируется и при необходимости корректируется.
- Разрабатывается геологическая модель.
- Проводится качественная или количественная оценка надежности ИГМ. Выясняется, какими могут быть ключевые инженерно-геологические факторы, определяющие поведение грунта и критические механизмы разрушения.
- Составляется программа дополнительных изысканий для снижения неопределенностей и достижения согласованности между концептуальным и наблюдательным компонентами модели.

- Разрабатываются геотехническая модель и оценка геоопасностей.
- Разрабатываются первоначальные аналитические модели с целью предоставления информации для проведения определенных видов анализа.
- Проверяется соответствие надежности ИГМ этапу проектирования.

Этап подготовки эскизного проекта / тендерного проекта

- Разработка более детальных геологической и геотехнической моделей, а также оценки геоопасностей благодаря дополнительным инженерным изысканиям.
- Создание аналитических моделей в целях предоставления информации для проектирования.
- Разработка дополнительных субмоделей для обеспечения большей надежности в более крупном масштабе по мере необходимости.
- Обеспечение передачи ИГМ участникам тендера, если это позволяют контрактные соглашения.

Этап детального проектирования

- Визуализация может представлять собой цифровую 3D-модель.
- Надежность соответствует целям в требуемом масштабе.
- На основе геологической модели, геотехнической модели и оценки геоопасностей создаются аналитические модели, имеющие высокую степень достоверности.

На этом этапе решаются следующие ключевые вопросы.

- Какие инженерно-геологические факторы определяют проектные решения на основе ИГМ до начала проведения анализа?
- Как результаты анализа помогают понять поведение грунта и его механизмы и согласуются ли они с концептуальным пониманием?
- Как инженерно-геологическая и аналитическая информация помогает выбрать расчетные параметры проекта? Как профиль рисков проекта влияет на проектные решения?

Этап строительства

- ИГМ используется в качестве инструмента прогнозирования строительных работ и постоянно обновляется по мере получения данных о грунтовых условиях в ходе строительства.
- ИГМ развивается совместно с наблюдениями и мониторингом строительства, помогает верификации проекта.
- ИГМ служит для регистрации фактических инженерно-геологических условий, обнаруживаемых в ходе строительства.
- Производится и используется интеграция ИГМ с информационной моделью строительного объекта (BIM).

2.6.3. ИГМ при инженерных изысканиях

После разработки исходной геологической модели и составления первоначального реестра

рисков можно запланировать инженерные изыскания для проверки модели и выявления областей неопределенности. С инженерно-геологической точки зрения изыскания должны быть сосредоточены на получении информации, относящейся к решению следующих ключевых задач.

- Подтверждение понимания особенностей обстановки, стратиграфии, структуры и поверхностных процессов на предполагаемой площадке строительства и вокруг нее. Данные могут собираться для конкретных мест расположения элементов объекта проектирования, например по его углам, но эти точки могут меняться со временем по мере изменения плана размещения объекта. Наиболее важные данные следует получать в местах, оптимальных для осмысления системы знаний первоначальной геологической модели, например на глубинах, достигающих до границ важных инженерно-геологических элементов. Однако, поскольку выделение средств на это бывает ограниченным, а в составлении программы изысканий должны участвовать все стороны, при планировании мест исследований всегда ищутся компромиссы.
- Оценка, описание и документирование инженерно-геологических элементов и условий с помощью наблюдений и испытаний для изучения поверхностных и подповерхностных условий.
- Исследование и описание любых геоопасностей или опасностей, связанных с реакциями грунтов, которые были указаны на стадии концептуализации.
- Оценка любых проблемных инженерно-геологических условий, о существовании которых известно, но которые настолько сложны, что их нецелесообразно исследовать достаточно детально.
- Поиск доказательств наличия любых проблемных инженерно-геологических условий, которые предполагались в процессе концептуализации, но не были обнаружены. Следовательно, если они неожиданно встретятся во время строительства, то потенциально могут рассматриваться как непредвиденные грунтовые условия, что может стать основанием для претензий.

На рисунке 2-18 представлена общая схема процесса использования системы знаний ИГМ для планирования и проведения инженерных изысканий. На рисунке 2-19 сопоставлены классический подход и современная практика проектирования

2.6.4. ИГМ при управлении строительством

Когда развитие проекта переходит на этап строительства, необходимо оценивать подверженные его воздействиям грунтовые условия в сравнении с возможными изменениями, ожидаемыми по ИГМ, а также определять, могут ли эти изменения повлиять на проект или методы строительства и требуется ли обновление оценки геотехнических рисков.

ИГМ также играет роль в процессе строительства, когда используется метод наблюдения. Этот метод, предложенный Пеком (Peck, 1969), дает методику проектирования и строительства, отличающуюся от работы с наблюдательной моделью и в общем и целом включающую следующие шаги.

- Рассмотрение и учет инженерных последствий разных вариантов инженерно-геологических условий, которые могли бы обоснованно ожидать в соответствии с ИГМ.
- Выполнение проектных расчетов для наиболее вероятных инженерно-геологических условий, но также обдумывание расчетов, подходящих для диапазона возможных инженерно-геологических условий, и обеспечение того, чтобы контракт позволял соответствующим образом изменять проект.

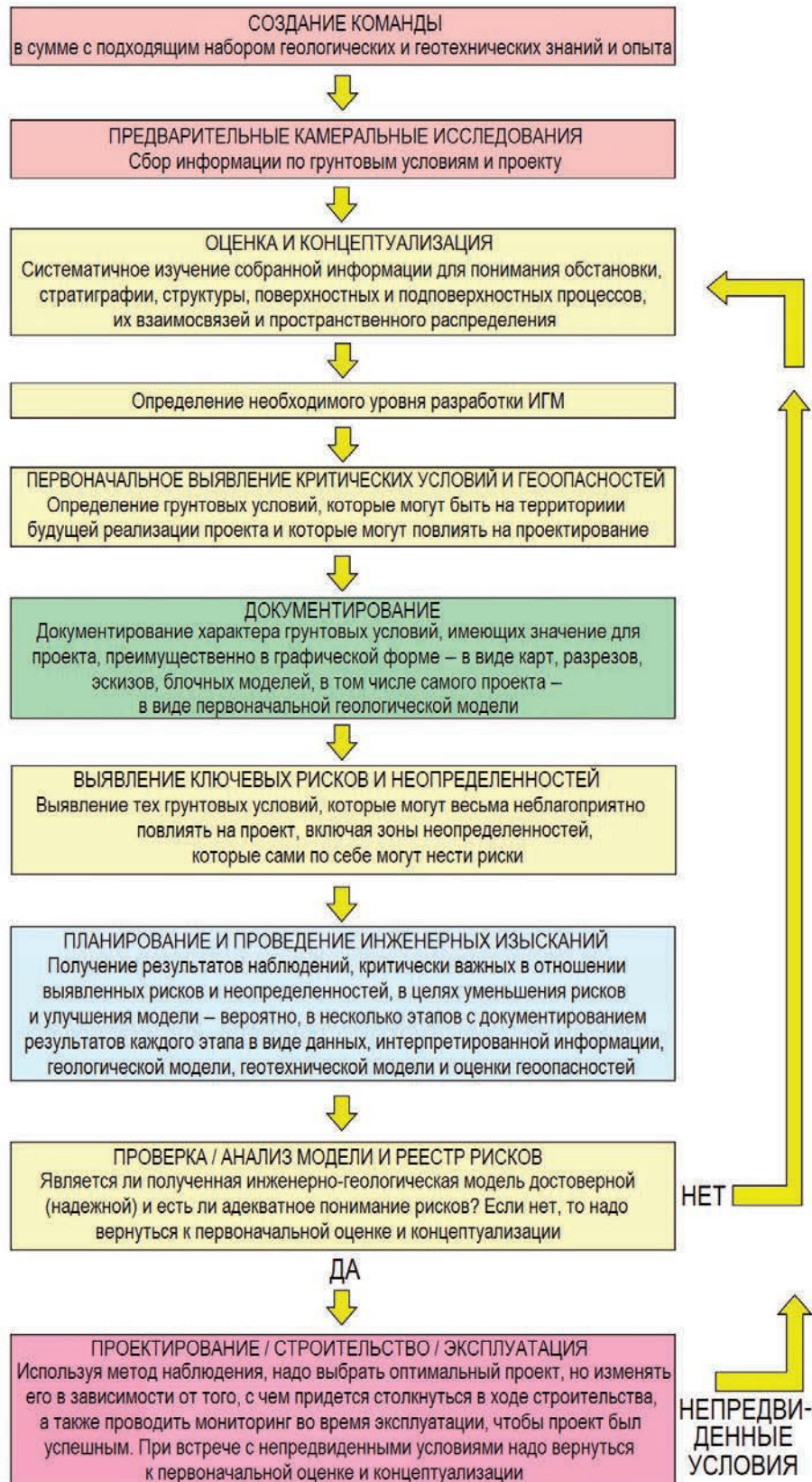


Рис. 2-18. Компоненты ИГМ и инженерные изыскания (по Baynes et al., 2021)

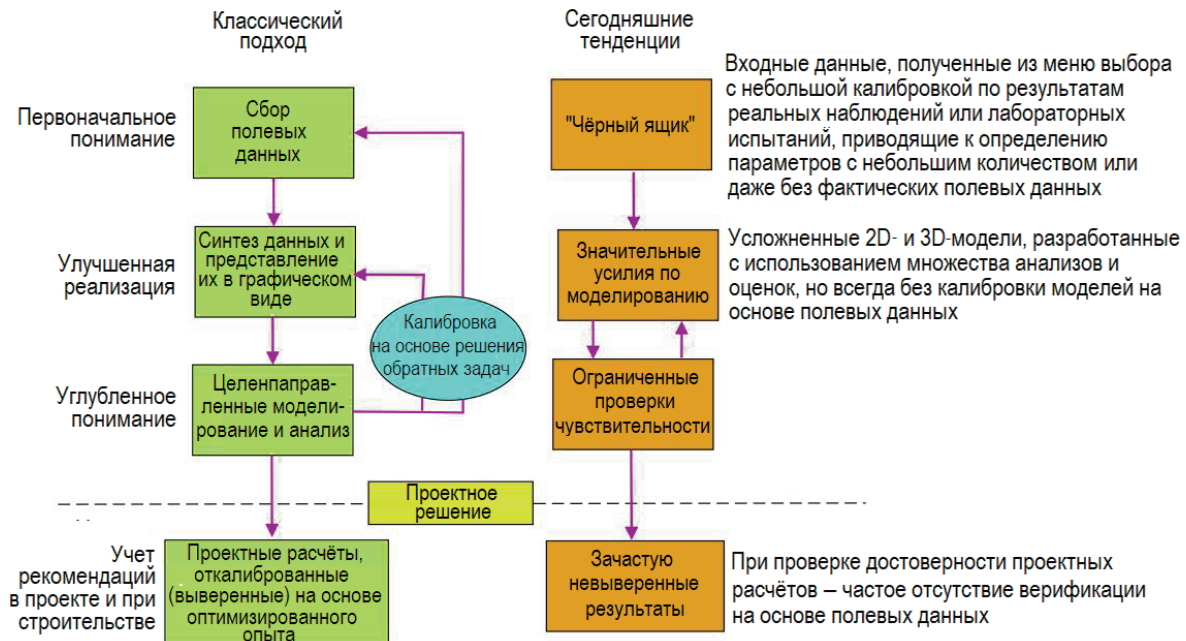


Рис. 2-19. Сопоставление классического подхода с современной практикой проектирования (по Carter, 2015)

Если встреченные в процессе строительства инженерно-геологические условия отличаются от ожидавшихся, расчеты должны быть соответствующим образом изменены. Это требует очень тесного взаимодействия между проектными группами, инженерами-геологами (изыскателями) и инженерами-строителями, поскольку должно быть обеспечено оперативное реагирование на различия между реально встреченными условиями и условиями, ожидавшимися по ИГМ.

2.7. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

AS1726. 2017. Australian Standard Geotechnical site investigations. Standards Australia, SAI Global, Sydney Australia, 75 p.

Baynes, F. J., Fookes, P. G. & Kennedy, J. F. 2005. The total engineering geology approach applied to railways in the Pilbara, Western Australia. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64, 67-94. <https://doi.org/10.1007/s10064-004-0271-4>.

Baynes, F. J., Parry, S., & Novotny, J., 2021. Engineering geological models, projects, and geotechnical risk. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 54. <http://doi.org/10.1144/qjegh2020-080>.

Baynes, F. J. and Parry, S. 2022. Guidelines for the development and application of engineering geological models on projects. International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) Commission 25 Publication No. 1, 129 p.

BIM Forum 2019. Level of Development (LOD) Specification 2019, Part I & Commentary for Building Information Models and Data. <https://bimforum.org/wp-content/uploads/2019/04/LOD-Spec-2019-Part-I-and-Guide-2019-04-29.pdf>, Accessed 7 January 2020.

Bock, H., Broch, E., Chartres, R., Gambin, M., Maertens, J., Maertens, L., Norbury, D., Pinto, P., Schubert, W. & Stille, H. 2004. The Joint European Working Group of the ISSMGE, ISRM and IAEG for the Definition of Professional Tasks, Responsibilities and Co-operation in Ground Engineering. In: Hack, R., Azzam, R. & Charlier, R. (eds), *Engineering geology for infrastructure planning in Europe*. Lecture Notes in Earth Sciences 104, Springer, Berlin, Heidelberg, 1–8, https://doi.org/10.1007/978-3-540-39918-6_1.

Bond, C. E., Shipton, A. D, Gibbs, A. D. & Jones, S. 2008. Structural models: Optimizing risk analysis by understanding conceptual uncertainty. *First Break*, 26(6), 65-71. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2008006>.

Carter, T. G. 1992. Prediction and uncertainties in geological engineering and rock mass characterization assessment. In: *Proceedings of the 4th Italian Rock Mechanics Conference*, Torino, 1.1–1.22.

Carter, T. G. 2015. On increasing reliance on numerical modelling and synthetic data in rock engineering. In: *Proceedings of the 13th ISRM International Congress on Rock Mechanics*, Montreal, Canada. Paper 821, 17p. ISBN: 978-1-926872-25-4.

Carter, T. G. & Marinos, V. 2020. Putting geological focus back into rock engineering design. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 53(10): 4487–4508. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02177-1>.

Carter, T. G. & Barnett, W. P. 2021. Improving reliability of structural domaining for engineering projects. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 28p. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02544-6>
Print ISSN: 0723-2632 Electronic ISSN: 1434-453X.

- Dematteis, A. & Soldo, L. 2015. The geological and geotechnical design model in tunnel design: estimation of its reliability through the R-Index. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, <https://doi.org/10.1080/17499518.2015.1104547>.
- Davis, J. 2017. Crossrail's experience of Geotechnical Baseline Reports (GBRs). *Crossrail Project: Infrastructure design and construction*, 4, Published Online: August 21, 2017, © Thomas Telford Limited and Crossrail, <https://doi.org/10.1680/cpid.63594.323>.
- Dearman, W. R., Baynes, F. J. & Irfan, T. Y. 1978, Engineering grading of weathered granite. *Engineering Geology*, 12, 354-374. <https://doi.org/10.1007/BF02635355>.
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G., & Foster, M. 2015. *Geotechnical engineering of dams*. London, CRC Press. ISBN 9781138749344 <https://doi.org/10.1201/b17800>.
- FIDIC. 2019. *Conditions of contract for underground works*. Geneva, Fédération Internationale des Ingénieurs-Conseils (FIDIC). ISBN 9782884320870.
- Fookes, P. G. 1997. *Geology for engineers: the geological model, prediction and performance*. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 30(4): 293–424, <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1997.030.P4.02>.
- Fookes, P. G., Baynes, F. J. & Hutchinson, J. N. 2000. Total geological history: a model approach to the anticipation, observation and understanding of site conditions. Invited Paper, *Proceedings of GeoEng2000, an International Conference on Geotechnical & Geological Engineering*, 19 – 24 November, Melbourne, Technomic Publishing Company Inc., Pennsylvania USA, 370–460.
- Fookes, P. G., Pettifer, G. & Waltham, T. 2015. *Geomodels in engineering geology – an introduction*. Dunbeath, UK, Whittles. 208 pp ISBN978-184995-139-5.
- Giles, P. G., Griffiths, J. S., Evans, D. J. A. & Murton, J. B. 2017. Geomorphological framework: glacial and periglacial sediments, structures and landforms. In: Griffiths, J. S. & Martin, C. J. (eds.) *Engineering Geology of Glaciated and Periglaciated Terrains*. Geological Society Engineering Geology Special Publication, 28, 59-368. <https://doi.org/10.1144/EGSP28.3>.
- Griffiths, J. S., 2019. Advances in engineering geology in the UK 1950-2018. *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology*, 52, 401-413. <https://doi.org/10.1144/qjgegh2018-171>.
- Haile, A. 2004. A reporting framework for geotechnical classification of mining projects. *AussIMM Bulletin*, September/October 2004: 30-37.
- Hoek, E. & Brown, E. T. 2019. The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 11(3), June 2019, 445-463. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>.
- Kessler, H., Wood, B., Morin, G., Gakis, A., McArdle, G., Dabson, O., Fitzgerald, R. & Dearden, R. 2015. Building Information Modelling (BIM) – a route for geological models to have real world impact. In:

MacCormack, K., Thorleifson, H., Berg, R. & Russell, H. (eds). Three-dimensional geological mapping: workshop extended abstracts. Geological Society of America Annual Meeting, Baltimore, Maryland, October 31, 2015; Alberta Energy Regulator, AER/AGS Special Report 101, 13–18.

Knill, J. L. 2003. Core values: the First Hans Cloos Lecture. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 62(1), 1–34, <https://doi.org/10.1007/s10064-002-0187-9>

Moon, A. T., Wilson, R. A. & Flentje, P. N. 2005. Developing and using landslide frequency models. In: Hungr, H., Fell, R., Couture, R. & Eberhardt, E. (eds), Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver. A. A. Balkema, Lieden. 681-690.

Morgenstern, N. R. & Cruden, D. M. 1977. Description and classification of geotechnical complexities: International Symposium on the Geotechnics of Structurally Complex Formations. Italian Geotechnical Society, 2, 195–204.

Norbury, D. 2020. Ground models; a brief overview. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 54, <https://doi.org/10.1144/qjagh2020-018>.

Parry, S., Baynes, F. J., Culshaw, M. G., Eggers, M., Keaton, J. F., Lentfer, K., Novotny, J. & Paul, D. 2014. Engineering geological models – an introduction: IAEG Commission 25. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73(3), 689–706. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0576-x>.

Paul, D. R. 2018. A simple method of estimating ground model reliability for linear infrastructure projects. IAEG/AEG Annual Meeting Proceedings, San Francisco, California, 2018 – Volume 2, Shakoor, A. & Cato, K. (eds.) https://doi.org/10.1007/978-3-319-93127-2_2.

Peck, R. B. 1969. Ninth Rankine Lecture: advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. Géotechnique, 19, 171 – 187.

Perello, P., Venturini, G., Dematteis, A., Bianchi, G., Delle Piane, L. & Damiano, A. 2005. Determination of reliability in geological forecasting for linear underground structures the method of the R-Index. Geoline 2005. Lyon (FR). 1–8.

Price, N. J. & Cosgrove, J. W. 1990. Analysis of geological structures, University Press, Cambridge, UK.

Shilston, D. T., Teeuw, R. M., West, G. & Engineering Group Working Party. 2012. Desk study, remote sensing, geographical information systems and field evaluation. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication, 25, 159–200. <https://doi.org/10.1144/EGSP25.06>.

Ting, C., Gilson, G. & Black, M. 2020. Developing the 3D geological model for Crossrail 2, London, UK. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 54, <https://doi.org/10.1144/qjagh2020-029>.

Turner, A. K., Kessler, H. & van der Meulen, M. J. (eds). 2021. Applied multidimensional geological modelling: informing sustainable human interactions with the shallow subsurface. London, Wiley, 450p, ISBN: 978-1-119-16312-1.



Vanmarcke, E. H. 1984. Random fields, analysis and synthesis. Cambridge (USA): MIT Press.

Venturini, G., Bianchi, G. W. & Diederichs, M. 2019. How to quantify the reliability of a geological and geotechnical reference model in underground projects. Society for Mining, Metallurgy & Exploration. 525-537.

Vessia, G., Di Curzio, D. & Castrignanò, A. 2020. Modeling 3D soil lithotypes variability through geostatistical data fusion of CPT parameters. Science of The Total Environment, Volume 6981, Article 134340.

Zaruba, Q. & Mencl, V. 1954. Engineering geology. Nakladatelství Československé akademie věd, Praha, 428p. (in Czech).

ПРИЛОЖЕНИЕ. УЧАСТНИКИ ПОДГОТОВКИ РУКОВОДСТВА

Роль	Имя и фамилия	Страна
Ведущий автор	Фред Бейнс (Fred Baynes)	Австралия
Ведущий автор	Стив Пэрри (Steve Parry)	Великобритания
Ведущий автор	Мартин Калшоу (Martin Culshaw)	Великобритания
Ведущий автор	Джим Гриффитс (Jim Griffiths)	Великобритания
Редактор от МАИГ	Йогендра Дева (Yogendra Deva)	Индия
Редактор от МАИГ	Антонио Дематтейс (Antonio Dematteis)	Италия
Редактор от МАИГ	Эрик Вундер (Erik Wunder)	Бразилия
Редактор от МАИГ	Хорхе Бежеман (Jorge Bejeman)	Аргентина
Редактор от МАИГ	Цзя-Цзюнь Дон (Jia-Jyun Dong)	Тайвань
Редактор от МАИГ	Билл Ханеберг (Bill Haneberg)	США
Редактор от МАИГ	Дуг Стэд (Doug Stead)	Канада
Редактор от МАИГ	Энн Уильямс (Ann Williams)	Новая Зеландия
Редактор от МАИГ	Энтони Боуден (Anthony Bowden)	Австралия
Участники	Фред Бейнс (Fred Baynes)	Австралия
	Ричард Брео (Richard Brehaut)	Австралия
	Роберто Краверо (Roberto Cravero)	Аргентина
	Мартин Калшоу (Martin Culshaw)	Великобритания
	Дэффидд Чандлер (Dafydd Chandler)	Великобритания
	Антонио Дематтейс (Antonio Dematteis)	Италия
	Йогендра Дева (Yogendra Deva)	Индия
	Цзя-Цзюнь Дон (Jia-Jyun Dong)	Тайвань
	Марк Эггерс (Mark Eggers)	Австралия
	Питер Фейр (Peter Fair)	Великобритания
	Робин Фелл (Robin Fell)	Австралия
	Фил Флентье (Phil Flentje)	Австралия
	Мартин Гриффин (Martin Griffin)	Великобритания
	Эндрю Форсайт (Andrew Forsythe)	Сингапур
	Джим Гриффитс (Jim Griffiths)	Великобритания
	Низам Хасан (Nizam Hasan)	Малайзия
	Крис Джек (Chris Jack)	Великобритания
	Грэм Джардин (Graeme Jardine)	Австралия
	Стратис Карантанеллис (Stratis Karantanellis)	Греция
	Алики Коккала (Alik Kokkala)	Греция
	Теэму Линдквист (Teemu Lindqvist)	Финляндия
	Роберт Маккин (Robert MacKean)	Великобритания
	Василис Маринос (Vassilis Marinos)	Греция
	Стюарт Миллис (Stuart Millis)	Гонконг
	Тим Нэш (Tim Nash)	Australia
	Джудит Натанаил (Judith Nathanail)	Великобритания
	Пол Натанаил (Paul Nathanail)	Великобритания
	Саймон Нелис (Simon Nelis)	Новая Зеландия
	Ян Новотный (Jan Novotny)	Чехия
	Стив Пэрри (Steve Parry)	Великобритания
	Даррен Пол (Darren Paul)	Австралия
	Алистер Шофилд (Alistair Schofield)	Австралия
	Дэвид Шилстон (David Shilston)	Великобритания
	Иэн Шипвей (Ian Shipway)	Австралия
	Кит Тёрнер (Keith Turner)	США
	Дэвид Уоринг (David Waring)	Великобритания
	Фелисия Вейр (Felicia Weir)	Австралия
	Энн Уильямс (Ann Williams)	Новая Зеландия
	Эрик Вундер (Eric Wunder)	Бразилия
Компания ВЕСА внесла особый вклад в раздел 3	Энн Уильямс (Ann Williams)	Новая Зеландия
	Джо Кант (Joe Cant)	Новая Зеландия
	Дэвид Добсон (David Dobson)	Новая Зеландия
	Кристоф Краус (Christoph Kraus)	Новая Зеландия
Комиссия МАИГ 28 (IAEG C28) внесла особый вклад в раздел 4	Алисия Ньютон (Alicia Newton)	Новая Зеландия
	Антонио Дематтейс (Antonio Dematteis)	Италия
	Уэйн Барнетт (Wayne Barnett)	Канада
	Тревор Картер (Trevor Carter)	Канада
	Диего Дикурцио (Diego Dicurzio)	Италия
	Джованна Вессия (Giovanna Vessia)	Италия